

SÉRIE A, N° 1755
N° D'ORDRE : 2621

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Jean ROIG

Ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure
Agrége de l'Université

1^{re} THÈSE — ÉTUDE PHOTOMÉTRIQUE DES ANNEAUX A L'INFINI
DES LAMES SEMI-ARGENTÉES ; APPLICATION AUX
RAIES ÉMISES DANS LA DÉCHARGE EN HAUTE FRÉ-
QUENCE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 1937, devant la Commission d'examen.

23 NOV 1937

MM. ABRAHAM, *Président.*

COTTON }
BRUHAT } *Examineurs.*

Éditions de la *Revue d'Optique théorique et instrumentale*

3 et 5, boulevard Pasteur — 165, rue de Sèvres

PARIS (XV^e)

1937

SÉRIE A, N° 1755

N° D'ORDRE : 2621

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Jean ROIG

Ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure
Agrégré de l'Université

1^{re} THÈSE — ÉTUDE PHOTOMÉTRIQUE DES ANNEAUX A L'INFINI
DES LAMES SEMI-ARGENTÉES ; APPLICATION AUX
RAIES ÉMISES DANS LA DÉCHARGE EN HAUTE FRÉ-
QUENCE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le

1937, devant la Commission d'examen.

MM. ABRAHAM, *Président.*

COTTON }
BRUHAT } *Examineurs.*

Éditions de la *Revue d'Optique théorique et instrumentale*

3 et 5, boulevard Pasteur — 165, rue de Sèvres

PARIS (XV^e)

1937

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen honoraire . . . M. MOLLIARD.

Doyen C. MAURAIN, *Professeur*, Physique du Globe.

<i>Professeurs honoraires</i>	H. LEBESGUE.	FREUNDLER.	MARCHIS.
	A. FERNBACH.	AUGER.	VESSIOT.
	Emile PICARD.	BLAISE.	PORTIER.
	Léon BRILLOUIN.	DANGEARD.	MOLLIARD
	GUILLET.	LESPIEAU.	LAPICQUE.
	PÉCHARD.		

PROFESSEURS

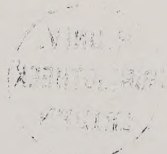
G. BERTRAND . . .	T	Chimie biologique.	ROBERT-LÉVY . . .	T	Physiologie comparée.
M. CAULLERY . . .	T	Zoologie (Evolution des êtres organisés).	F. PICARD		Zoologie (Evolution des êtres organisés).
G. URBAIN	T	Chimie générale.	Henri VILLAT . . .	T	Mécanique des fluides et applications.
Emile BOREL . . .	T	Calcul des probabilités et Physique mathématique.	Ch. JACOB	T	Géologie.
Jean PERRIN . . .	T	Chimie physique.	P. PASCAL	T	Chimie minérale.
H. ABRAHAM . . .	T	Physique.	M. FRÉCHET . . .	T	Calcul différentiel et calcul intégral.
E. CARTAN	T	Géométrie supérieure.	E. ESCLANGON . .	T	Astronomie.
A. COTTON	T	Recherches Physiques.	M ^{me} RAMART-LUCAS.	T	Chimie organique.
J. DRACH	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	H. BÉGHIN	T	Mécanique physique et expérimentale.
Charles FABRY . .	T	Physique générale.	FOCH		Mécanique expérimentale des fluides.
Charles PÉREZ . .	T	Zoologie.	PAUTHENIER . . .		Physique (P. C. B.).
Léon BERTRAND .	T	Géologie structurale et géologie appliquée.	De BROGLIE . . .	T	Théories physiques.
E. RABAUD	T	Biologie expérimentale.	CHRÉTIEN		Optique appliquée.
M. GUICHARD . . .		Chimie minérale.	P. JOB		Chimie générale.
Paul MONTEL . . .	T	Théorie des fonctions et Théorie des transformations.	LABROUSTE		Physique du Globe.
P. WINTREBERT .	T	Anatomie et histologie comparées.	PRENANT		Zoologie.
L. BLARINGHEM .	T	Botanique.	VILLEY		Mécanique physique et expérimentale.
O. DUBOSCQ . . .	T	Biologie maritime.	BOHN		Zoologie (P. C. B.).
G. JULIA	T	Mécanique analytique et Mécanique céleste.	COMBES	T	Physiologie végétale.
C. MAUGUIN . . .	T	Minéralogie.	GARNIER	T	Mathématiques générales.
A. MICHEL-LÉVY	T	Pétrographie.	PÉRÈS		Mécanique des fluides.
H. BÉNARD	T	Mécanique expérimentale des fluides.	HACKSPILL		Chimie (P. C. B.).
A. DENJOY	T	Application de l'Analyse à la Géométrie.	LAUGIER	T	Physiologie générale.
L. LUTAUD	T	Géographie physique et géologie dynamique.	TOUSSAINT		Technique Aéronautique.
Eugène BLOCH . .	T	Physique théorique et physique céleste.	M. CURIE		Physique (P. C. B.).
G. BRUHAT		Physique.	G. RIBAUD	T	Hautes températures.
E. DARMOIS . . .		Enseignement de Physique.	CHAZY	T	Mécanique rationnelle.
A. DEBIERNE . . .	T	Physique Générale et Radioactivité.	GAULT		Chimie (P. C. B.).
A. DUFOUR	T	Physique (P. C. B.).	CROZE		Recherches Physiques.
L. DUNOYER . . .		Optique appliquée.	DUPONT	T	Théories chimiques.
A. GUILLIERMOND	T	Botanique.	LANQUINE		Géologie.
M. JAVILLIER . . .		Chimie biologique.	VALIRON		Mathématiques générales.
L. JOLEAUD		Paléontologie.	BARRABÉ		Géologie structurale et géologie appliquée.
			MILLOT		Zoologie (P. C. B.).
			F. PERRIN		Théories physiques.
			VAVON		Chimie organique.
			G. DARMOIS . . .		Calcul des Probabilités et Physique mathématique.

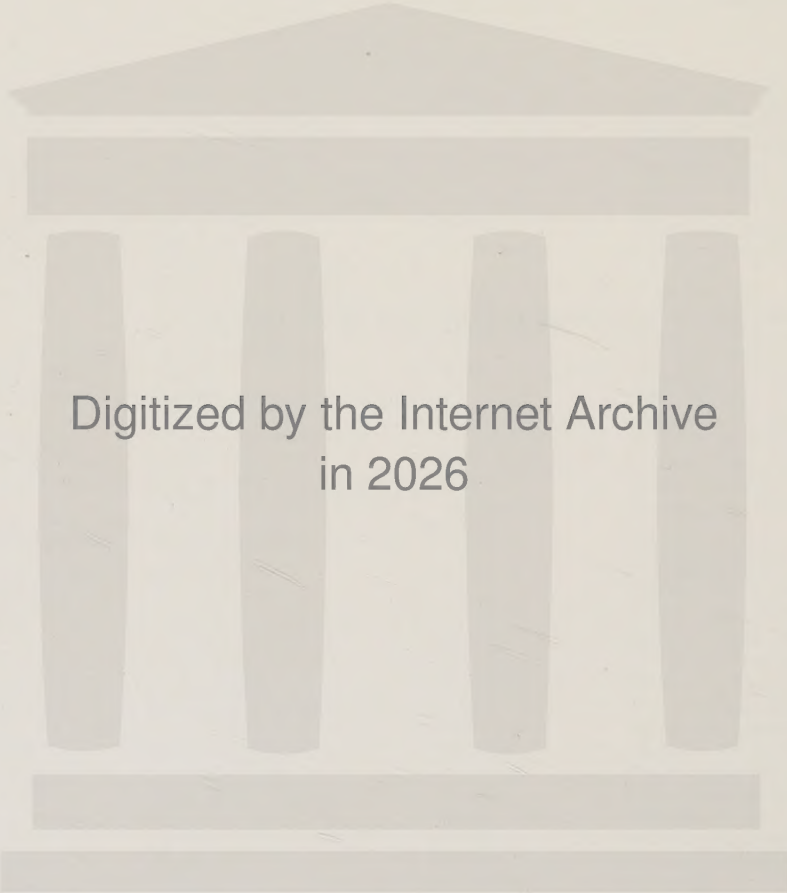
Secrétaire A. PACAUD.

Secrétaire honoraire . . . D. TOMBECK.



A LA MÉMOIRE DE MON PÈRE





Digitized by the Internet Archive
in 2026

A MONSIEUR HENRI ABRAHAM

Hommage de profonde reconnaissance

INTRODUCTION

M. Félix Esclangon, Maître de Conférences à la Faculté de Lille, m'avait signalé l'intérêt que pouvait présenter, dans l'étude des structures de raies, l'illumination des gaz raréfiés sous l'action de courants entretenus de haute fréquence ; ces sources sont particulièrement intenses, et d'un emploi très commode ; il était intéressant de rechercher leurs qualités du point de vue de la finesse des raies émises.

J'ai été ainsi amené à étudier les méthodes de mesure de largeurs ou de structures de raies.

La petitesse des variations de longueur d'onde à mesurer rend nécessaire l'emploi d'appareils à grand pouvoir de résolution (interféromètre, lame de Lummer, réseau à échelon).

Les interféromètres sont particulièrement commodes ; il suffit de modifier la distance des lames pour obtenir le pouvoir de résolution désiré ; aussi les anneaux à l'infini ont-ils été fréquemment utilisés dans les études spectroscopiques. Les premières expériences dans ce sens ont été les mesures visuelles de Michelson (*a*) ; l'observateur écartait progressivement les miroirs de l'interféromètre jusqu'à disparition complète des anneaux ; la largeur d'une raie simple est liée à l'ordre d'interférence limite N par la relation :

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda}{N} .$$

Michelson a tiré de remarquables résultats de l'observation visuelle des anneaux pour des raies complexes ; il estimait la visibilité des franges, définie par le rapport :

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} .$$

L'observateur traduisait l'impression visuelle par un chiffre compris entre 0 et 20 et construisait ainsi la courbe de variation de la visibilité en fonction de la différence de marche ; l'allure du graphique permettait de déceler la complexité des raies.

(*a*) Michelson. *Phil. Mag.* 31 (1891), 338 ; 34 (1892), 280.

On a essayé, par la suite, de rendre les mesures plus objectives; les anneaux de Michelson sont actuellement remplacés par les figures d'interférence plus fines que donnent les lames semi-argentées de Perot et Fabry (*b*). Quand le pouvoir réflecteur des argentures est de l'ordre de 0,8 ou 0,9, ces lames donnent, pour une raie monochromatique, des anneaux brillants très étroits séparés par de larges intervalles obscurs; elles étalent suivant un véritable spectre une raie élargie ou les composantes de radiations complexes. Le plus souvent, la faible quantité de lumière et la nécessité de faire une analyse fine de la figure d'interférence imposent l'emploi de la plaque photographique et d'un microphotomètre. Malheureusement, il existe en photométrie photographique bien des causes d'erreurs, et une grande prudence est nécessaire dans l'utilisation des plaques.

Généralement, les auteurs se bornent, dans l'étude des structures hyperfines, à mesurer l'écartement des composantes; les mesures d'intensité sont plus rares (*c*). Il est cependant nécessaire d'y recourir pour l'étude des largeurs de raies; on détermine en ce cas les points des anneaux où l'intensité est la moitié de l'intensité maximum.

Les premières mesures photométriques sont dues à Koch (*d*); l'auteur a étudié expérimentalement la répartition de l'intensité dans les anneaux de Michelson et a construit la courbe de visibilité pour la raie rouge du cadmium; il a également fait quelques mesures sur les anneaux de Perot et Fabry.

Plus récemment, Van der Slooten et Janssen (*e*) ont mesuré les courbes de visibilité pour l'interféromètre de Michelson; l'accord entre les observations visuelles et les mesures photographiques ne serait satisfaisant qu'en lumière polarisée.

Enfin Burger et van Cittert (*f*) et Minkowski (*g*) ont entrepris l'étude systématique des relations entre les largeurs mesurées directement sur les anneaux, la largeur imposée par les appareils pour une raie monochromatique, et la largeur vraie de la raie utilisée.

Je me suis proposé de reprendre le problème général des mesures photométriques sur les anneaux d'interférence, en augmentant le plus possible leur précision.

La première partie de ce travail a uniquement pour objet les méthodes d'étalonnage des plaques et l'élimination ou la correction des erreurs.

Dans la deuxième partie, je donne d'abord quelques indications concernant la théorie et l'emploi des étalons de Perot et Fabry. Je décris ensuite les sources de

(*b*) Fabry, *Interférences Lumineuses*, Editions de la Revue d'Optique. Fabry et Perot, *Ann. de Chimie et de Physique*, 16 (1899). Fabry et Perot, *id.*, 22 (1901).

(*c*) Schüler et Keyston, *Zs. für Phys.*, 67 (1931), p. 433. Tolansky, *Proc. Roy. Soc. London*, 146 (1934), p. 818.

(*d*) Koch, *Ann. der Physik*, 34 (1911), 377. *Id.*, 42 (1913), p. 1.

(*e*) Van der Slooten et Janssen. *Zs. für Physik*, 86 (1933), p. 760.

(*f*) Burger et van Cittert. *Zs. für Physik*, 44 (1927), p. 58.

(*g*) Minkowski et Bruck. *Zs. für Physik*, 95 (1935), p. 299.

haute fréquence utilisées, la préparation des semi-argentures et la mesure de leur pouvoir réflecteur; enfin les appareils de protection thermique de l'interféromètre.

La troisième partie donne les résultats des mesures : j'ai d'abord facilement vérifié que le carré des rayons des anneaux successifs varie bien comme la suite des nombres entiers.

J'ai ensuite examiné la distribution de la lumière dans les anneaux de la raie rouge du cadmium, aux faibles différences de marche, et je l'ai comparée à la distribution théorique déduite du pouvoir réflecteur. La variation de largeur des anneaux pour des différences de marche croissantes montre que la raie émise dans les tubes de haute fréquence comporte un pied important et explique les anomalies observées dans les expériences précédentes.

J'indique enfin diverses mesures faites sur les conditions électriques et optiques de la décharge dans l'hélium, ainsi que des observations concernant les perturbations intenses subies par les raies dans l'illumination en haute fréquence.

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure. Il m'est particulièrement agréable d'exprimer à M. Henri Abraham toute ma reconnaissance pour les facilités qu'il m'a accordées, et surtout pour les précieux conseils qu'il m'a donnés. Je remercie également MM. Eugène et Léon Bloch qui m'ont fourni d'utiles renseignements et M. Georges Bruhat dont les suggestions m'ont été précieuses.

Enfin je dois des remerciements à mes camarades et au personnel du Laboratoire, auprès de qui j'ai toujours trouvé le plus cordial concours.

PREMIÈRE PARTIE

MÉTHODES PHOTOMÉTRIQUES

I. — GÉNÉRALITÉS SUR LA PHOTOMÉTRIE PHOTOGRAPHIQUE

J'ai été amené, au cours de recherches sur les anneaux des lames semi-argentées, à examiner les méthodes qui permettent d'étudier, par photométrie photographique, une figure *monochromatique* à l'infini.

Ribaud (1) et Cabannes (2) ont donné une étude critique des divers procédés de graduation de la lumière. Je rappellerai brièvement certains points et en premier lieu quelques propriétés des plaques photographiques.

Noircissement des plaques photographiques (3).

Une plaque photographique exposée à la lumière, puis développée et fixée, présente, en chacun de ses points, un noircissement qui dépend de l'éclairement subi, du temps de pose et des conditions de traitement.

Si l'on pouvait considérer la plaque photographique comme une lame absorbante à faces parallèles, il serait facile de définir un coefficient de transmission; si la lame reçoit un flux lumineux Φ_1 et transmet un flux Φ_2 , le coefficient de transmission T est donné par l'équation :

$$T = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}.$$

La densité optique D est définie par l'égalité $D = \log_{10} 1/T$. Cette grandeur varie généralement avec la longueur d'onde.

En réalité, la plaque photographique est un milieu trouble et il convient de préciser, dans toute définition de densité, l'ouverture angulaire du faisceau incident et l'ouverture angulaire du faisceau transmis recueilli par l'appareil

(1) Ribaud. *Annales de Physique*, 12 (1919), p. 136.

(2) Cabannes. *Annales de Physique*, 15 (1921), p. 86.

(3) Fabry et Buisson. *Revue d'Optique*, 3 (1924), p. 1.

de mesure (1) ; en général, les photomètres utilisent des faisceaux très convergents, pour lesquels la densité optique dépend peu de l'angle d'ouverture.

Si on mesure les densités produites sur une plaque photographique par des éclairagements différents, toutes les autres conditions demeurant identiques, on peut construire la *caractéristique de noircissement* de la plaque ; on représente cette courbe en portant en abscisses les logarithmes des éclairagements qui ont impressionné la plaque et en ordonnées la densité (fig. 1) ; la courbe comporte une partie rectiligne, qui est la région d'exposition normale.

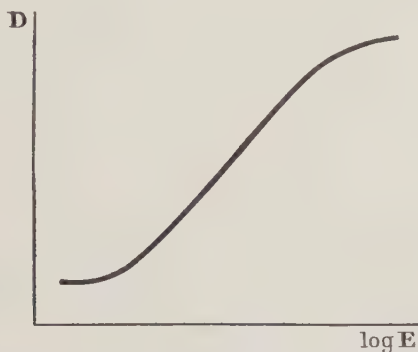


FIG. 1. — Caractéristique de noircissement.

Principes de la photométrie photographique.

Toute mesure de photométrie photographique consiste à apprécier l'égalité d'éclairement de deux plages.

Deux éclairagements monochromatiques sont égaux si, agissant sur deux points voisins et identiques d'une même plaque pendant le même temps, ils produisent après développement la même densité.

Je me suis efforcé dans mes mesures de me rapprocher autant que possible de ces conditions.

1° Les deux plages à comparer doivent être posées pendant des temps égaux et, autant que possible, au même instant, afin que s'éliminent les variations possibles de la source.

Dans le cas où les poses sont successives, il convient de réduire au minimum le temps qui les sépare, et de ne développer la plaque que plusieurs heures après la dernière pose ; l'image latente évolue en effet entre l'impression et le développement. Cette évolution est d'autant plus lente qu'un temps plus long s'est écoulé depuis l'exposition à la lumière (2).

(1) Boutry. Publications du Ministère de l'Air, n° 38, p. 7.

(2) Jausseran. *Annales de Physique*, 5 (1936), p. 355.

2° Les deux plages à comparer doivent être formées en des points voisins de l'émulsion, car la sensibilité de la plaque n'est pas uniforme ; il est bon de prendre des plages de faible dimension (quelques millimètres carrés), aussi rapprochées que possible ; je me suis efforcé, de plus, de contrôler l'uniformité de l'émulsion.

Graduation de la lumière.

Pour étudier la répartition de l'éclairement lumineux sur une figure dont l'image se forme sur une plaque photographique, il est nécessaire de construire la caractéristique de noircissement, et par suite d'exposer la plaque à des éclairagements dont les valeurs relatives soient connues. Divers systèmes de réduction du flux lumineux ont été employés à cet effet (1). La méthode de réduction par des diaphragmes est peu précise et exige qu'on fasse des poses successives pour déterminer plusieurs points de la courbe d'étalonnage ; la méthode du secteur tournant, souvent employée, a l'inconvénient d'étalonner la plaque en éclairage intermittent, ce qui risque de fausser les mesures. L'emploi d'écrans auxiliaires nécessite un étalonnage préalable de ces écrans ; encore est-il prudent de les étalonner dans les conditions mêmes où ils seront utilisés. Le procédé le plus souple et le plus satisfaisant paraît être l'utilisation de prismes polarisants.

En donnant à l'angle des sections principales d'un analyseur et d'un polariseur une valeur convenable, on peut obtenir avec une bonne précision et dans de très larges limites le coefficient de réduction désiré.

Je vais indiquer, dans le chapitre suivant, une méthode de mesure qui, basée sur l'emploi de prismes polarisants, donne en une seule pose la courbe d'étalonnage et la figure à étudier. Cette méthode permet soit d'étudier directement les anneaux d'interférence, soit d'étalonner des écrans auxiliaires, qui serviront ensuite à graduer les plaques photographiques.

II. — PRINCIPE DES MÉTHODES DE MESURES

A. Emploi d'un biréfringent.

Montage schématique (fig. 2).

Dans le spectre de raies d'une source lumineuse, un monochromateur isole une radiation ; la fente de sortie F de l'appareil a, pour préciser, les dimensions

(1) Orstein, Moll et Burger : Objektive Spektralphotometrie (1932), p. 77.

Dobson, Griffith, Harrison : Photographic Photometry (1926), Oxford.

Dorgelo. *Zs. für Physik*, 31 (1925), p. 327.

1 mm $\times$ 8 mm. Cette fente F est placée au foyer d'un objectif O_1 ayant environ 15 cm de distance focale ; un deuxième objectif O_2 de 50 cm de distance focale donne une image définitive F' de F sur une plaque photographique ; entre O_1 et O_2 se trouve un interféromètre Perot et Fabry. L'appareil donne des anneaux à l'infini, qui se projettent sur la plaque ; on ne voit en réalité que la partie des anneaux découpée par l'image F'. J'oriente les lames de l'interféromètre de manière à observer la partie diamétrale du système d'anneaux.

De plus, entre l'interféromètre et l'objectif O_2 , je place, normalement au faisceau lumineux, un prisme polariseur de Glazebrook et un biréfringent de Wollaston ; de la sorte, l'image F' est, en réalité, dédoublée en deux images A et B. Ces deux images A et B sont verticales, séparées par une distance de 6 mm environ et ont pour dimensions 3 $\times$ 25 mm.

Les deux images A et B sont ainsi photographiées simultanément. Après traite-

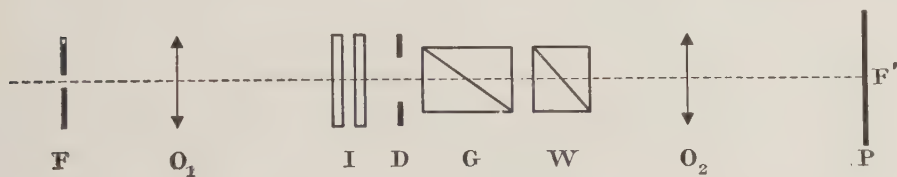


FIG. 2. — Schéma du montage optique.

ment, les négatifs sont examinés au microphotomètre enregistreur de Moll. Sur le cylindre de l'appareil s'inscrivent les déplacements du spot d'un galvanomètre, relié à une pile thermoélectrique qui reçoit les flux lumineux transmis par les différents points du cliché.

Principes de l'étalonnage.

Soit θ l'angle plan du dièdre formé par le plan principal du glazebrook et l'un des plans de polarisation du biréfringent. J'appellerai points « homologues » ou points « correspondants » de A et B deux images d'un même point de F. Deux points homologues reçoivent à chaque instant des éclairagements dont le rapport est

$$a = \operatorname{tg}^2 \theta.$$

Faisons pour l'instant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- 1° En l'absence des interférences, les plages A et B seraient uniformément éclairées ;
- 2° La plaque photographique est uniformément sensible ;
- 3° L'appareil enregistreur, qui mesure le noircissement de chaque point du cliché, est fidèle.

Dans ces conditions, je fais, sur le même papier enregistreur et avec le même.

zéro du galvanomètre de Moll, l'analyse des plages A et B; pour simplifier, je supposerai que les centres des anneaux sur les deux courbes ont même abscisse (fig. 3). J'obtiens ainsi les enregistrements A_e et B_e .

Soit I l'éclairement reçu par le point P correspondant à un maximum de l'enregistrement A_e ; au maximum P' correspondant de B_e , l'intensité (1) sera :

$$I_1 = I_0 \operatorname{tg}^2 \theta = a I_0.$$

Les points M_1 et N_1 de la courbe A_e où le noircissement est le même qu'en P' auront aussi reçu une intensité :

$$I_1 = a I_0.$$

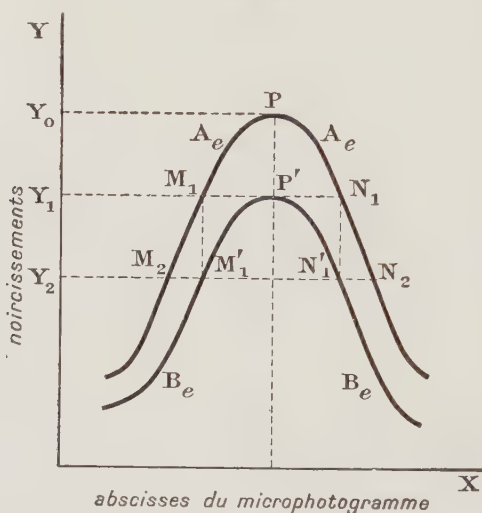


FIG. 3.

A ces points correspondent sur la courbe B_e deux autres points M'_1 et N'_1 , ayant respectivement la même abscisse que les précédents; l'intensité lumineuse sera :

$$I_2 = a \times a I_0 = a^2 I_0.$$

Par cheminement, on arrive ainsi à faire correspondre à certaines ordonnées $Y_0, Y_1, \dots, Y_n$ mesurées sur l'enregistrement A_e des intensités $I_0, a I_0, a^2 I_0, \dots, a^n I_0$.

Si l'on porte, sur un graphique, en abscisses les nombres Y , en ordonnées les logarithmes des intensités $a^n I_0$, on trace une courbe d'étalonnage; cette courbe est une courbe en S, analogue aux courbes de noircissement des plaques photographiques. Comme nous avons constamment comparé des noircissements égaux,

(1) Pour la commodité du langage, j'emploierai indifféremment les mots « intensité » ou « éclairement ».

nous avons éliminé l'influence d'accidents tels que le voile photographique.

Les deux poses étant simultanées, il n'y a à craindre ni les variations de la source, ni l'évolution de l'image latente. Les deux plaques A et B sont enregistrées sur la même plaque ; les inégalités de traitement (développement, fixage, séchage) sont réduites au minimum.

Enfin les points à comparer sont situés à quelques millimètres les uns des autres ; on n'a pas à craindre des variations trop grandes dans la sensibilité de l'émulsion.

Remarquons de plus que cette méthode supprime toute erreur due à la détermination des temps de pose. Enfin les faisceaux lumineux comparés sont confondus pendant la presque totalité de leur parcours et ne se séparent qu'au moment de traverser l'objectif photographique.

B. Principe de la méthode utilisant des écrans auxiliaires.

Des écrans affaiblisseurs ont été étalonnés, dans les conditions mêmes où ils seront étudiés, et avec la même longueur d'onde. Chacun de ces écrans est formé d'une série de plaques de coefficient d'absorption connu (fig. 13). Les dimen-

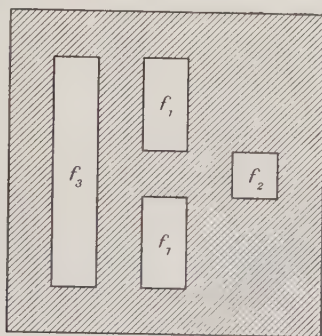


FIG. 4.

sions totales du système de plaques dégradées sont de 1 cm sur 1 cm ; il y a cinq à six plaques juxtaposées. Le montage schématique comprend encore la fente F, l'objectif O_1 , l'objectif O_2 .

Dans le système optique conjugué antérieurement de la fente F (fig. 10 b), se trouve une image agrandie F_3 de cette fente : c'est un rectangle de 1 cm sur 5 cm, matérialisé par une ouverture, percée dans un écran opaque. Je place dans le plan de F_3 un diaphragme percé de deux fenêtres complémentaires (fig. 4) ; la première fenêtre f_1 reproduit exactement les dimensions de F_3 , mais comporte en son centre un écran de 1 cm de hauteur ; la deuxième fenêtre f_2 a exactement les dimensions de cet écran et par suite a aussi les dimensions du système de plaques dégradées.

L'interféromètre étant en coïncidence avec l'image du diaphragme d'ouverture des faisceaux lumineux, je fais une première pose en plaçant devant le rectangle F_3 la fenêtre f_1 ; de la sorte la plaque enregistre le système d'anneaux, moins la partie centrale de la figure. Je fais aussitôt après une deuxième pose *de même durée*, après avoir enlevé une lame de l'interféromètre, pour supprimer les anneaux, et avoir placé la fenêtre f_2 et le système de plages dégradées devant la partie primitivement cachée du rectangle F_3 . Pour obtenir exactement le même temps de pose, il est parfois nécessaire d'affaiblir uniformément le faisceau lumineux ; il suffit pour cela d'intercaler une lame semi-platinée, d'opacité convenable, dans un plan conjugué du diaphragme d'ouverture du faisceau. De la sorte, au centre de l'image des anneaux, sur la plaque photographique, j'obtiens l'image des plages d'étalonnage.

L'enregistrement microphotométrique donne à la fois la répartition de l'éclairement dans les anneaux et l'éclairement des plages témoins. Toutes ces images se trouvent en des points voisins de la plaque.

Dans cette méthode, les deux poses ne sont pas simultanées, mais successives ; il faut développer la plaque au bout d'un temps assez grand par rapport à l'intervalle qui sépare les poses, pratiquement après plusieurs heures. On évite ainsi les erreurs que pourrait introduire l'évolution de l'image latente.

J'examinerai plus loin les avantages et inconvénients que présentent ces deux méthodes de mesure ; je vais préciser les erreurs expérimentales qui leur sont communes et en premier lieu les erreurs concernant l'image photographique.

III. — ERREURS CONCERNANT L'IMAGE PHOTOGRAPHIQUE

J'examinerai ici :

- a) le rôle du grain des plaques ;
- b) le rôle d'un éclairement non uniforme de la fente, dont on photographie l'image ;
- c) le rôle de la non uniformité des plaques : même en mettant à part le phénomène du grain, on constate des variations dans la sensibilité moyenne de l'émulsion.

A. Grain de plaque.

Les enregistrements présentent les dentelures connues sous le nom de grain de plaque ; en des points de la plaque distants de quelques dizaines de microns, le rayon et surtout le nombre des grains d'argent réduits subissent des variations ; l'importance de ces variations dépend du noircissement. Le « grain » est surtout

marqué dans la partie intéressante de la courbe de noircissement, là où le contraste est le plus fort (partie rectiligne) ; il s'atténue pour les régions sous-exposées ; il disparaît presque complètement pour les noircissements très forts.

Pour les émulsions fines, on a, à noircissement égal, un plus grand nombre de grains d'argent, donc une répartition plus uniforme ; mais la finesse augmente aux dépens de la sensibilité.

J'ai employé d'abord des plaques Lumière micropanchromatiques, puis des hypersensitives Ilford.

La plaque Lumière rouge très lente présente un grain très fin. J'ai utilisé cette émulsion pour préparer des écrans photographiques de densité connue.

Le grain de plaque est d'autant plus gênant que le microphotomètre de Moll exige l'emploi de clichés clairs. On peut essayer d'atténuer le grain par le choix du révélateur et des conditions d'enregistrement.

Certains révélateurs paraissent affaiblir les irrégularités des enregistrements ; la question a été très discutée (1) ; j'ai observé une très nette influence du développement lent à la paraphénylènediamine. Le révélateur Agfa 12, qui permet un développement rapide, paraît donner de meilleurs résultats que les révélateurs usuels ; voici sa composition :

Eau	1 000 g
Métol	8,00
Sulfite de soude cristallisé	250,00
Soude caustique	5,75
Bromure de potassium.....	2,50

Les révélateurs à l'hydroquinone tendent à produire des irrégularités plus fortes.

L'influence du révélateur est néanmoins assez faible, exception faite de la paraphénylènediamine ; encore faut-il remarquer que le gain en finesse s'accompagne en ce cas d'une diminution du contraste.

On peut essayer d'estomper les irrégularités de l'enregistrement en amortissant le galvanomètre microphotométrique très au delà de son amortissement critique ; mais ce procédé risque de fausser la valeur moyenne du noircissement, dans les régions où l'intensité varie rapidement.

On peut également augmenter les dimensions de la fente exploratrice : le faisceau lumineux traversera une surface plus large de la plaque et les variations accidentelles de l'émulsion auront une amplitude plus faible ; la dimension de la fente exploratrice parallèlement à la tangente aux anneaux peut être augmentée, dans la mesure où la courbure des anneaux n'est pas gênante ; par contre l'autre dimension de la fente ne peut être prise trop grande ; on pourra évidemment prendre des fentes d'autant plus larges que l'image des anneaux à étudier sera elle-même plus grande.

(1) Funk. *Zs. für wiss. Phot.*, 32 (1934), p. 95.

Pratiquement j'ai utilisé :

1° Un galvanomètre répondant en 0,1 seconde ; à l'amplification 50 et à la vitesse de déplacement maximum, la durée d'un tour complet du cylindre est de 10 minutes ; en 0,1 seconde le papier se déplace d'environ $1/15$ de millimètre.

D'ailleurs, le retard du galvanomètre tendrait simplement à provoquer un léger décalage de l'anneau parallèlement à l'axe des abscisses.

2° L'image de la fente exploratrice a une hauteur de 1 mm, une largeur de $1/20$ mm environ ; avec l'amplification 50, la position du spot donne la valeur moyenne de l'intensité sur un intervalle de 2,5 mm, mesuré sur l'enregistrement. Comme les concavités sont faibles, les déviations ne diffèrent pratiquement pas des valeurs vraies. Une correction serait d'ailleurs possible.

Le grain de plaque pourrait encore être atténué par un procédé qui revient à augmenter les dimensions du spot explorateur : on peut reproduire la plaque initiale sur une plaque lente à grain plus fin (Lumière rouge) en donnant au cliché original des translations parallèles aux raies, durant la reproduction. Cette méthode obligerait à prendre sur le cliché original des images plus grandes ; d'où un certain nombre d'inconvénients, tels que l'augmentation des temps de pose et des variations plus grandes dans la sensibilité de la plaque.

Sur mes enregistrements, le grain est encore assez important, mais il est facile de déterminer la position moyenne de la courbe.

L'erreur commise dans la lecture de la déviation du spot enregistreur est au plus $1/4$ de millimètre ; l'intensité correspondante est connue avec une erreur *relative* maximum de $1/2$ pour 100.

B. Eclairement non uniforme des images, en l'absence des anneaux.

Pour réaliser un éclairage uniforme de la fente F du monochromateur, j'ai placé la source sur la pupille d'entrée de l'appareil ; l'image reçue par la plaque photographique est en entier dans le champ de pleine lumière. Les faisceaux tombant sur les divers points de la plaque ont donc la même ouverture. Néanmoins l'éclairement de l'image est généralement plus grand au centre que sur les bords.

D'autre part, les plaques n'ont pas une sensibilité uniforme ; le noircissement d'une plaque uniformément éclairée varie d'un point à un autre, même si l'on fait abstraction du grain. Les inégalités dépendent en premier lieu de l'émulsion.

Les plaques $6\frac{1}{2} \times 9$ cm utilisées ont été coupées par le fabricant dans des plaques 4 fois plus grandes préparées directement ; deux des bords, à angle droit, sont franchement mauvais, sur une largeur d'au moins 1 centimètre ; un bourrelet de gélatine s'est formé là, quand on a étendu l'émulsion ; la sensibilité est plus forte en cette région.

Les inégalités de développement, de fixation et de séchage modifient aussi le noircissement de la plaque.

Pour les atténuer, j'ai développé les clichés en les badigeonnant avec un pinceau de martre ; de la sorte le révélateur est sans cesse renouvelé au voisinage de l'émulsion ; ce procédé donne des négatifs plus uniformes ; la durée de développement est diminuée (2 minutes 30 secondes au lieu de 5 minutes).

Les plaques sont ensuite rincées 1 minute à l'eau courante, fixées 10 minutes et lavées 1 heure dans un courant d'eau de source ; pour éviter des dépôts calcaires, je termine par un lavage de 5 minutes à l'eau distillée. Les plaques sèchent verticalement ; il faut éviter des séchages trop longs, qui pourraient donner des irrégularités de noircissement (1).

Malgré toutes ces précautions, on peut observer des variations de densité qui, pour des régions distantes d'environ 1 cm sur le cliché, pourraient introduire des erreurs photométriques de 5 % environ.

De toutes façons, on ne peut supposer ni que l'éclairement de la fente est uniforme, ni que la plaque a une sensibilité uniforme ; néanmoins les écarts ne dépassent pas quelques unités pour cent et il est possible de faire les corrections nécessaires.

1. MÉTHODE DU BIRÉFRINGENT.

J'ai employé la méthode suivante : les images A et B des anneaux ont une largeur de 3 mm, une hauteur de 2 cm, 5 ; la largeur de la partie non impressionnée entre A et B est 6 mm.

Une première pose permet d'enregistrer les images A et B ; les anneaux sont ensuite supprimés sans que soit modifié le réglage des appareils : il suffit d'intercaler entre les lames de l'interféromètre un porte-objet de microscope, qui brouille complètement la figure d'interférence. Le polariseur est légèrement tourné, de façon que les deux faisceaux aient la même intensité à la sortie du biréfringent. L'angle θ est alors de 45° .

Ceci étant, je fais deux nouvelles poses, en déplaçant le chariot porte-plaque une première fois de 3 mm vers la droite, et une deuxième fois de 3 mm vers la gauche, à partir de sa position initiale. Chaque image A et B est alors bordée de deux images de contrôle a_1 , a_2 et b_1 , b_2 (fig. 5).

Si l'éclairement est uniforme et si la plaque est uniformément sensible, les plages a_1 et b_1 , a_2 et b_2 sont identiques et présentent en tous leurs points le même noircissement.

S'il y a de légers écarts, les plaques sont étalonnées de façon approchée, comme il a été dit plus haut. A l'aide de cette courbe d'étalonnage, on peut, en chaque point de l'enregistrement, faire les corrections d'après les variations du noircisse-

(1) Roig et Thouvenin. *C. R.*, 202 (1936), p. 1982.

ment tout le long des plages de contrôle. Ces corrections portent à la fois sur les inégalités d'éclairement et sur les variations de sensibilité.

Examinons de plus près leur mécanisme ; pour simplifier l'exposé, je considérerai les deux cas extrêmes :

- a) la plaque est uniforme, mais l'éclairement de la fente ne l'est pas ;
- b) l'éclairement est uniforme, mais la sensibilité de la plaque varie.

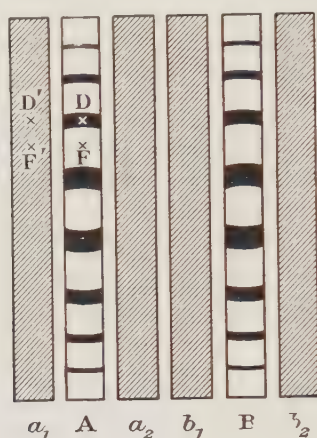


FIG. 5.

a) Les quatre plages de contrôle sont identiques.

La variation de noircissement le long de chaque plage correspond aux variations d'éclairement de la fente. L'étude des images A et B a donné une courbe approchée d'étalonnage C (fig. 6) ; les ordonnées représentent les logarithmes des éclairements reçus, les abscisses sont proportionnelles aux déviations du spot microphotométrique. Je prends comme point de référence sur la plage A le maximum D d'un anneau, et je me propose d'abord de comparer les éclairements reçus par D et par un autre point F de la même plage A (fig. 5).

Le point D a reçu l'éclairement E_D ; la déviation correspondante du spot est Y_D . Le point F est caractérisé par E_F et Y_F . Dans une des plages de contrôle, D et F ont pour points homologues D' et F', définis respectivement par les grandeurs $E_{D'}$, $Y_{D'}$ et $E_{F'}$, $Y_{F'}$.

Si l'éclairement de la fente était uniforme, nous aurions :

$$Y_{D'} = Y_{F'}, \text{ et } E_{F'} = E_{D'}.$$

En réalité, les microphotogrammes donneront des valeurs différentes, par exemple :

$$E_{F'} = kE_{D'}.$$

Cette relation entre l'intensité observée $E_{F'}$ et l'intensité $E_{D'}$ qui correspondrait à une fente uniformément éclairée, est également vraie pour le point F, qui occupe, dans la plage A, la position homologue du point F'. Il faudra donc diviser par le coefficient k l'éclairement mesuré E_F ; on aura alors la valeur E_F^V , qu'aurait donnée une fente uniforme.

Pratiquement, tout se passe comme si, au point F, la caractéristique devait être déplacée par translation parallèlement à l'axe des $\log E$ d'une quantité $\log k$. La comparaison des noircissements en F' et D' permet donc de déterminer la correction à faire sur le noircissement mesuré au point F.

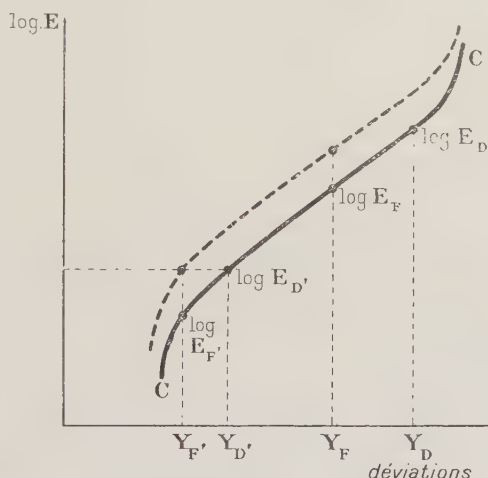


FIG. 6.

b) *L'éclairement de la fente est uniforme ; mais la sensibilité de la plaque varie d'un point à l'autre.*

Deux plages de contrôle homologues a et b ont reçu le même éclairement ; ce sont en effet deux images d'une même fente, données par le biréfringent quand l'azimut de polarisation est de 45° . Néanmoins, par suite des variations de l'émulsion, le noircissement n'est pas le même en deux points d'une même plage ou en deux points homologues d'une plage a et d'une plage b . Ces variations sont continues et leur amplitude est faible sur la distance de 6 mm qui sépare les images à comparer. Soient a' et b' les courbes microphotométriques obtenues en prenant sur l'enregistrement les moyennes des ordonnées de a_1 et a_2 , b_1 et b_2 respectivement. On peut admettre que a' et b' représentent pratiquement ce qu'auraient donné des plages de contrôle enregistrées dans des conditions identiques, exactement là où se sont formées les images A et B. L'examen de la courbe a' permet de comparer

deux points quelconques de la plage A ; le fait que a' et b' ont reçu les mêmes éclairissements permet de relier les points de A aux points de B.

Pratiquement, le problème est le suivant : soit un point de référence D sur l'image A ; je suppose connue la caractéristique C_D de la plaque *en ce point* ; je veux comparer l'éclairissement des anneaux en D et en un point F de l'image A ou B ; j'ignore quelle est la caractéristique C_F de la plaque au point F.

Les plages de contrôle indiquent simplement des déviations moyennes Y'_D et Y'_F (points U et V de la fig. 7) au voisinage des points D et F. Ainsi, quand la déviation est Y'_F , le point F a reçu l'éclairissement représenté non pas par le point V sur la

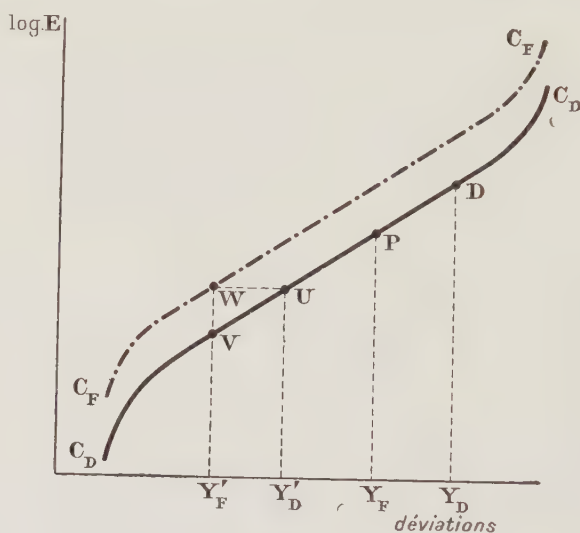


FIG. 7.

courbe C_D , mais par le point W qui a la même ordonnée que le point de référence U. La caractéristique C_F passe par W.

Le noircissement des anneaux au point F est repéré par une déviation Y_F ; à cette déviation correspond un point P sur C_D . Sachant qu'au point V correspond le point corrigé W, par quel point du graphique faudra-t-il remplacer P ?

Tout dépend de la forme de C_F ; nous savons uniquement que cette courbe passe par le point W, et *a priori* son tracé peut être quelconque. Faisons toutefois les remarques suivantes :

1° Aux noircissements très faibles ou très forts, la plaque paraît avoir une sensibilité uniforme ; une parallèle à l'axe des Y (déviations) coupe donc, dans ces domaines, les caractéristiques des diverses régions de la plaque en des points d'abscisses très voisines.

2° Sur quelques millimètres carrés de plaque la pente de la caractéristique ne peut avoir changé beaucoup.

Nous pouvons donc admettre que la caractéristique de F se déduit encore de celle de D par une translation parallèle à l'axe des $\log E$ et d'amplitude VW .

Cette supposition est confirmée par l'expérience ; on peut déterminer, en utilisant divers couples d'anneaux dans A et B, les caractéristiques en plusieurs régions de la plaque ; les courbes obtenues sont pratiquement confondues.

La correction s'effectue alors comme au paragraphe précédent ; les deux corrections sont additives et l'on peut donc tenir compte à la fois des variations de sensibilité et des variations d'éclairement.

ÉTALONNAGE CORRIGÉ DE LA PLAQUE. — En résumé, une courbe d'étalonnage approché a permis de corriger en chaque point du graphique les erreurs dues aux variations de sensibilité de la plaque et aux variations d'éclairement de la fente ;

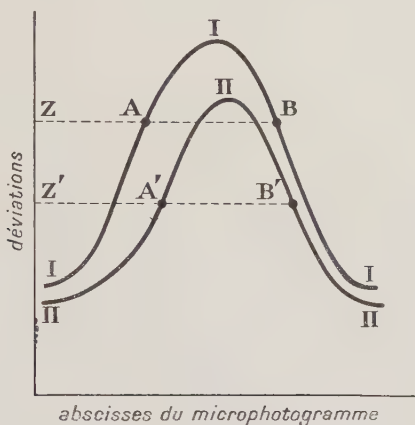


FIG. 8.

je peux ainsi reconstituer, après rectification de leurs ordonnées, les courbes expérimentales ; j'obtiens le schéma représenté sur la figure 8.

Les courbes obtenues seraient données par une plaque de sensibilité uniforme, photographiant à travers l'interféromètre une fente uniformément éclairée.

Il convient maintenant d'éviter les erreurs possibles de lecture, au cours du nouvel étalonnage, ainsi que les erreurs dues à de légers écarts dans le tracé de la courbe.

Je procède encore par cheminement, en faisant intervenir non pas seulement quelques points, mais tous les points du graphique, afin d'éviter les erreurs accidentelles.

Soit une ordonnée Z ; la courbe I détermine sur la parallèle à l'axe des abscisses, d'ordonnée Z , un segment AB ; avec un compas à pointe sèche, je cherche le palier horizontal de II de largeur $A'B' = AB$. L'ordonnée est Z' .

L'intensité correspondant à $Z' =$ l'intensité correspondant à $Z \times a$.

J'établis ainsi un tableau de correspondance entre Z et Z' , et un graphique (courbe α , fig. 9) ; si l'on était sur une partie rectiligne de la caractéristique de plaque, la courbe α serait une parallèle à la bissectrice des axes.

Le cheminement peut se faire en menant de A , point correspondant à un maximum des anneaux, une parallèle à OZ jusqu'à sa rencontre avec la bissectrice ; puis, du point obtenu, une parallèle à OZ' jusqu'à sa rencontre avec la courbe α , et ainsi de suite ; on a une série de nombres $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ représentant des intensités proportionnelles à $1, a, \dots, a^n$. Pour diminuer encore les erreurs de lecture je construis la courbe (Z', Z) en permutant les axes (courbe β) ; le chemin ANR donne directement le point R où l'intensité est a^2 fois l'intensité de A .

Remarquons que dans le tracé de α et β nous avons pu corriger les points où se trouvaient des erreurs accidentelles.

Le cheminement effectué à partir du point A ne nous donne guère que cinq

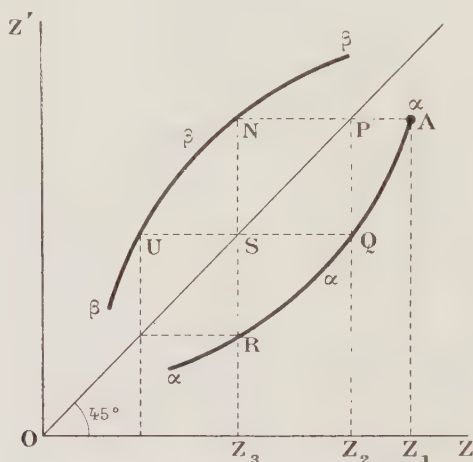


FIG. 9. — Diagramme d'étalonnage.

points de la courbe d'étalonnage ; on ne saurait augmenter outre mesure le nombre des paliers, sans risquer d'accumuler les erreurs (on ne peut prendre θ trop voisin de 45°). Néanmoins, il est possible d'obtenir d'autres points de la courbe d'étalonnage : nous pouvons opérer des cheminements à partir non plus du point A , mais d'un point quelconque du graphique ; à chaque point de départ choisi, correspond une courbe en S déterminée par cinq points (1).

Si, pour chaque courbe en S , nous avons pris une unité d'intensité arbitraire, nous devons, si aucune erreur n'a été commise, pouvoir superposer toutes ces

(1) On connaît de plus deux asymptotes verticales correspondant au zéro du galvanomètre enregistreur (noircissement infini) et à sa déviation maximum (noircissement nul).

courbes par simple translation parallèle à l'axe des $\log E$; l'amplitude de cette translation est facile à déterminer en prenant la différence des ordonnées pour les parties rectilignes des courbes ; on peut ainsi rappeler, sur la courbe obtenue à partir du point A, un nombre de points aussi grand qu'on le désirera.

Enfin, il est possible d'avoir un contrôle direct de l'étalonnage ; pour cela je recommence sur la même plaque la même série d'images, mais avec un angle θ plus petit ; de la sorte le maximum en B sera voisin du minimum en A ; je peux également choisir pour les plages de contrôle une intensité voisine des valeurs précédentes ; cela supprimera, dans les corrections, toute hypothèse sur la pente de la caractéristique.

Supposons qu'au maximum de l'image B corresponde ainsi le palier MN de la courbe I relative à l'image A. Entre le palier MN et le maximum D de la plage A pris pour unité existe un rapport connu d'intensité. Même si le rayon des anneaux s'était modifié entre les deux séries de poses, je pourrais, en prenant pour abscisses les carrés des rayons, reconstituer une courbe identique à la première ; le palier M_1N_1 de cette courbe, correspondant au palier MN, devra avoir la même intensité que dans la première mesure, d'où un recouplement des opérations d'étalonnage.

Remarque. — Les faisceaux lumineux qui forment sur la plaque deux images homologues sont polarisés à angle droit ; on pourrait craindre qu'à intensité égale, ils n'impressionnent différemment l'émulsion.

L'expérience montre que cette objection n'est pas fondée ; si l'on fait deux expériences en permutant les plages A et B, on obtient les mêmes résultats. Les plages de contrôle prises avec un azimut de polarisation de 45° ont en moyenne la même intensité. Enfin, même si l'effet existait, l'emploi des plages de contrôle permettrait justement de l'éliminer dans les mesures.

2. MÉTHODE DE L'ÉCRAN AUXILIAIRE.

Les corrections se font d'une façon analogue à ce qui a été expliqué pour la première méthode. Dans le plan de l'image F_3 , conjuguée de F par rapport au système optique antérieur, je peux placer une troisième fenêtre f_3 , qui permettrade border l'image principale de deux plages de contrôle a et b , au cours de deux poses de même durée, après déplacement de la plaque photographique (fig. 4).

Là encore, on assurera un noircissement convenable à l'image, tout en maintenant le même temps de pose que pour les anneaux, en plaçant des lames semi-platinées dans un plan conjugué du diaphragme d'ouverture.

J'indiquerai dans le chapitre suivant la réalisation pratique des procédés dont je viens d'exposer le principe.

IV. — MONTAGES ET APPAREILS

A. Méthode du biréfringent.

Dans les deux méthodes de mesures, j'utilise à peu près les mêmes appareils ; je vais les décrire pour la première de ces méthodes et j'indiquerai plus loin les modifications apportées pour l'emploi d'écrans auxiliaires.

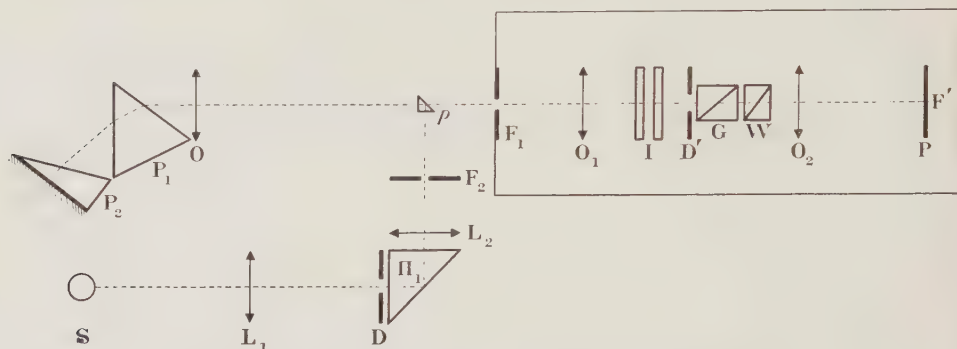


FIG. 10 a. — Schéma du montage, méthode du biréfringent.

Distances focales : O 100 cm O₁ 15 cm O₂ 50 cm.

L₁ 30 cm L₂ 15 cm.

La figure 10 a donne le schéma général du montage. Une lentille L₁ projette l'image de la source S sur un diaphragme D, qui limite l'ouverture des faisceaux ;

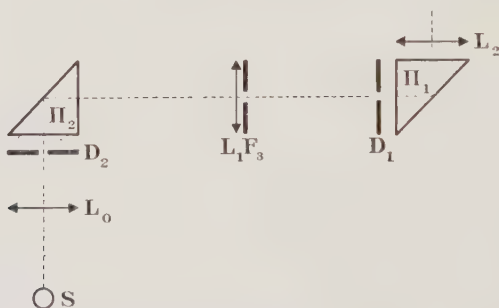


FIG. 10 b. — Système antérieur au prisme Π_1 , méthode de l'écran auxiliaire.

Distances focales : L₀ 20 cm L₁ 30 cm.

une lentille L₂ projette une image de D sur l'objectif O d'un spectrographe ; après L₂ la lumière tombe sur la fente d'entrée du spectrographe, qui fonctionne comme monochromateur ; après la fente de sortie F₁ nous retrouvons le dispositif déjà décrit.

L'appareil est coudé par des prismes à réflexion totale Π_1 et Π_2 .
Je vais examiner en détail les différentes parties du montage.

1° *Le monochromateur.*

Le monochromateur est un spectrographe à prismes, utilisant un montage par réflexion (fig. 10 a) ; la lumière issue de la fente d'entrée F_2 est renvoyée vers l'objectif par un petit prisme à réflexion totale p .

L'objectif a 8 cm de diamètre et 100 cm de distance focale ; le faisceau traverse ensuite un prisme P_1 de 8 cm de hauteur, dont la base est un triangle équilatéral de 10 cm de côté, et un prisme P_2 . P_2 est la moitié d'un prisme identique à P_1 , sectionné par le plan de symétrie passant par une arête ; le plan de section est argenté ; de la sorte la lumière retransverse tout le système optique, ce qui double la dispersion (20 Å par millimètre environ) ; une image de F_2 se forme finalement sur la fente F_1 .

RÉGLAGE DU SPECTROGRAPHE. — a) *Réglage de la fente d'entrée F_2 .* — Pour placer cette fente au foyer de l'objectif O, je remplace le prisme Π_1 par une glace semi-transparente G placée où se trouvait la face hypoténuse de Π_1 ; en D se trouve un écran de gélatine colorée, qui isole dans le spectre d'arc la radiation étudiée, généralement la raie 6 438 Å du cadmium.

Le réglage se fait par autocollimation : j'intercale entre O et P_1 une glace plane, orientée de façon à renvoyer le faisceau sur lui-même ; la fente F_2 porte un fil de réticule transversal : un viseur observe à travers la glace semi-transparente G le réticule et son image de retour.

b) *Mise en place de la fente F_1 .* — Le train de prismes P_1 et P_2 est enlevé et remplacé par un prisme à réflexion totale ; la lumière pénètre par la face hypoténuse et est renvoyée après deux réflexions parallèlement à elle-même, quelle que soit l'orientation du prisme auxiliaire, pourvu que le rayon moyen du faisceau incident soit dans un plan de section principale.

Sur un verre dépoli, placé dans le plan où se forme normalement le spectre, on devrait avoir une image de F_2 ; en réalité, les erreurs de taille du prisme à réflexion totale provoquent généralement l'apparition de deux images : la fente F_1 sera placée en leur milieu M.

c) *Réglage des prismes au minimum de déviation.* — Le train de prismes est mis en place ; P_2 est mobile autour de l'axe vertical de symétrie du prisme P_1 . Je donne à P_2 une orientation telle que l'image de la raie étudiée se forme sur M ; je fais ensuite tourner P_1 jusqu'à obtention du minimum de déviation ; puis P_2 pour ramener l'image en M, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'image se fasse en M pour le minimum de déviation de P_1 .

EMPLOI DU MONOCHROMATEUR. — La fente de sortie doit être assez large ; en effet les anneaux d'interférence se formeront transversalement sur l'image photographique de cette fente ; il faut, par suite, donner à F_1 et F_2 une largeur de 1 mm environ ; de là la nécessité d'employer un spectrographe assez dispersif pour éviter l'empiètement des images de F_2 , données par deux radiations voisines.

Le problème est facilité par le fait que les sources ne donnent que des raies d'arc, généralement faciles à séparer. Dans le cas de la raie rouge du cadmium, on n'a à craindre aucun empiètement de la raie faible voisine 6 330 Å.

Il faut diminuer la lumière diffusée dans le monochromateur : un écran de gélatine colorée, placé sur le diaphragme D, ne laisse passer que la partie intéressante du spectre. D'autre part, de petits écrans placés entre O et F_2 arrêtent les images parasites qu'entraîne l'emploi d'un spectrographe à réflexion.

2° Les objectifs O_1 et O_2 et le porte-plaque.

La fente de sortie F_1 est au foyer de l'objectif O_1 ; c'est l'objectif d'une bonne lunette de Steinheil, bien corrigée pour le foyer et l'infini ; sa distance focale est 15 cm. Cet objectif est réglé par autocollimation.

O_2 est un objectif de Elwall, de 50 cm de distance focale.

Dans le plan de l'image définitive est placé un chariot porte-plaque ; une vis micrométrique permet de donner à la plaque des translations parallèles à son grand côté. La plaque est verticale ; on peut la faire tourner autour d'un axe normal à son plan.

La mise au point se fait en déplaçant le chariot, et en observant à la loupe l'image d'anneaux à l'infini très resserrés (grandes différences de marche) ; si le réglage de O_1 est bon, on voit simultanément au point l'image des anneaux et celle de la fente F_1 .

3° Diaphragmation du faisceau.

Le faisceau est défini d'une part par la fente F_1 , de l'autre par le diaphragme d'ouverture placé en D.

La lentille L_2 donne une première image de D sur l'objectif O ; une deuxième image D' se forme à peu près à égale distance de O_1 et O_2 ; en plaçant l'œil dans le plan de la plaque photographique, on vérifie que, pour tous les points de l'image, le faisceau est limité par le diaphragme D. C'est sur D que se forme l'image de la source et que se trouve l'écran de gélatine colorée ; de la sorte on assure du mieux possible l'uniformité d'éclairement de la fente. De même l'interféromètre sera placé au voisinage de D'.

4° Prismes polarisants.

Entre les objectifs O_1 et O_2 , le faisceau est parallèle, et ses dimensions latérales sont limitées par l'image D' du diaphragme ; là se trouvent les appareils de polari-

sation; l'image D' se forme au centre d'un prisme de Glazebrook de 2 cm de côté; un cercle gradué permet d'en repérer l'orientation; la partie fixe de son support porte un prisme biréfringent de Wollaston. Le système glazebrook-wollaston constitue ainsi un ensemble solidaire; on peut le déplacer sans le dérégler; il est monté sur une plate-forme horizontale à trois vis calantes.

MISE EN PLACE DES PRISMES POLARISANTS. — a) *Réglage du glazebrook.* — Le support du glazebrook est un cylindre de laiton C solidaire du disque gradué; sur ce support s'appuie, au moyen de trois vis calantes V_2 , un manchon M dans lequel

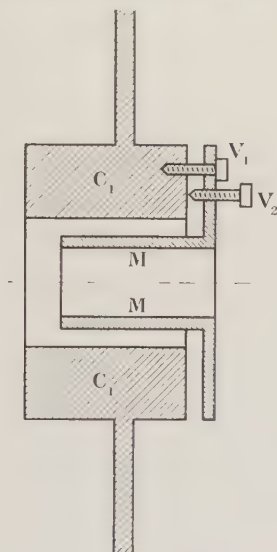


FIG. 11. — Monture du glazebrook.

est mastiqué le prisme; trois vis de fixation V_1 lient le manchon M au cylindre C (fig. 11). Il faut assurer la perpendicularité de l'axe de rotation à la face d'entrée du prisme; j'utilise pour cela une lunette autocollimatrice à réticule éclairé; en agissant sur les vis V_2 , puis sur les vis V_1 , on obtient que l'image de retour reste fixe pendant une rotation complète du disque gradué; ce réglage est assuré à 2 ou 3 minutes près.

b) *Réglage du biréfringent.* — Le prisme de Wollaston est ensuite placé derrière le prisme de Glazebrook, de façon à donner aux images une séparation horizontale. Il est monté sur un support analogue au précédent, et réglé par autocollimation de façon que la normale à sa face d'entrée soit parallèle à la normale aux faces du glazebrook.

c) *Mise en place du système polarisant.* — Le système est alors placé entre O_1 et O_2 au voisinage de l'image D' ; j'ai au préalable repéré dans le plan de la plaque

photographique le centre de l'image de la fente ; par autocollimation, je place les faces des prismes normalement au rayon moyen du faisceau.

ERREUR SUR LES MESURES D'ANGLES. — Ces mesures sont effectuées avant la pose photographique. Pour faire les lectures, le système glazebrook-wollaston est enlevé du montage ; on place à sa suite un nicol et on observe le filament d'une forte lampe à incandescence. En général, on aperçoit deux images ; on éteint l'une afin de ne pas être gêné par son éclat, en tournant le nicol de sortie ; on détermine la position d'extinction de l'autre image en tournant le glazebrook. Cela fait, on donne à partir de cette position une rotation connue au glazebrook (39° environ).

L'erreur maximum commise sur la mesure de l'angle θ est d'environ 2 minutes. Calculons l'erreur sur a :

$$a = tg^2\theta$$

$$\frac{da}{a} = \frac{4d\theta}{\sin 2\theta}.$$

Pour $\theta = 39^\circ$ $\sin 2\theta = 0,978 \approx 1$.

$$\frac{da}{a} \sim \frac{1}{400}.$$

Nous avons utilisé dans l'étalonnage le nombre $(a)^4$ (cinq paliers du cheminement) ; l'erreur maximum sur les intensités est, au point le plus bas de la courbe :

$$\frac{dI}{I} = \frac{4 da}{a} = \frac{1}{100}.$$

Dans une mesure de contrôle, je détermine directement, en prenant pour θ une valeur plus faible, le rapport entre l'intensité maximum et une intensité correspondant à une ordonnée voisine du minimum.

Avec $\theta = 39^\circ$ $a^4 = 0,185$.

Si nous voulons un rapport $a' = 0,185$, il faut un angle

$$\theta = 23^\circ 16' ;$$

cela donne : $\sin 2\theta \approx 0,700$.

L'erreur maximum commise sur l'intensité sera alors :

$$\frac{dI}{I} = \frac{4 \times 6}{0,7 \times 10^4} = \frac{24}{7\,000} \approx \frac{1}{300}.$$

Cette mesure de contrôle permet de connaître avec plus de précision le rapport entre le maximum et le minimum des anneaux.

Remarquons que l'erreur absolue sur a^4 est au plus $2/1000$ de l'intensité

maximum ; nous verrons que cette erreur est négligeable, par rapport aux erreurs de lecture des enregistrements. Le grain de plaque impose une erreur absolue dont la limite supérieure est à peu près constante, et égale à 1/100 de l'intensité maximum.

La détermination de l'angle de polarisation du wollaston, quand on enregistre les plages de contrôle, n'introduit pas une erreur d'angle supplémentaire : cette opération remplace l'erreur de lecture dans la détermination de la position d'extinction, par l'erreur commise en plaçant le polariseur à 45°. En effet, supposons que la position d'extinction soit déterminée avec une erreur α ; l'angle θ qui sert à l'étalonnage est en réalité :

$$\theta' = \theta + \alpha \quad \alpha > 0 \text{ par exemple.}$$

La courbe donnée par l'image B sera au-dessous de la courbe vraie.

Mais la même erreur α se retrouvera sur les plages de contrôle ; les courbes de contrôle au voisinage de A seront au-dessus des courbes au voisinage de B ; les corrections donneront donc pour B des points au-dessus des points expérimentaux.

Il n'y a, en résumé, pour les mesures d'angles, que deux sources d'erreurs : les deux lectures au polariseur au moment de l'enregistrement des anneaux et des plages. Nous avons justement supposé dans le calcul qu'il y avait deux lectures sur le cercle divisé.

B. Emploi d'écrans auxiliaires.

Quand on emploie des écrans auxiliaires, il faut modifier le montage optique antérieur au diaphragme D_1 ; la lentille L_2 de 15 cm de distance focale donne une image agrandie F_3 de la fente F_2 à 60 cm environ en avant du diaphragme D_1 (fig. 10 b).

Je place en F_3 un diaphragme rectangulaire qui encadre cette image ; ses dimensions sont 1×5 cm.

C'est là que se trouvera la plaque percée des fenêtres f_1, f_2, f_3 dont il a été question au chapitre précédent ; là également sera placé l'écran auxiliaire à plages dégradées. Juste en avant de F_3 se trouve une lentille de 30 cm de distance focale, sans bulles ni défauts ; cette lentille, formant l'image de la source sur D_1 , assure un éclairage uniforme de F_3 . Il ne faut plus laisser en D_1 l'écran de gélatine colorée qui, diffusant un peu la lumière, pourrait fausser le rapport des intensités transmises par les plages d'étalonnage ; la lentille L_1 donne de D_1 une image D_2 ; dans le plan de cette image je place le filtre monochromatique et un diaphragme à iris. Les écrans semi-platinés, qui permettent d'obtenir le même temps de pose pour les diverses images à comparer, sont également placés contre D_2 ; une lentille de 20 cm forme sur D_2 l'image de la source. Le prisme à réflexion totale H_2 a été placé entre

D_2 et L_1 pour des raisons de commodité, afin de ne pas allonger exagérément le montage.

Les écrans d'étalonnage sont des écrans photographiques ; quand on opère en lumière monochromatique, des franges localisées peuvent se former sur la couche de gélatine ; ces franges se projettent sur l'image finale et gêneraient considérablement la mesure photométrique ; elles disparaissent cependant si on fait tourner de quelques degrés l'écran autour d'un axe vertical ; les franges localisées se brouillent alors et donnent un fond continu.

Préparation des écrans d'étalonnage.

J'utilise des plaques Lumière rouge, lentes mais à grain très fin.

La figure 12 représente le montage, la source est unelampe à incandescence de 75 watts à verre opale ; un condenseur C en donne une image sur l'objectif photo-



FIG. 12. — Préparation des écrans auxiliaires.

graphique O ; contre C est placé un diaphragme carré de 42 mm de côté ; l'image de C se fait sur la plaque photographique, avec le coefficient de réduction 1/4. Un volet permet de démasquer le diaphragme par tranches successives de 7 mm de hauteur ; on peut obtenir 6 plages sur la plaque photographique.

Dans une première expérience, je trace la caractéristique de noircissement de la plaque pour divers temps de pose ; cette courbe permet de déterminer le temps de pose à prendre, pour obtenir un noircissement connu.

Voici par exemple les données pour un des écrans, N° B 236 :

Plages	1	2	3	4	5	6
Poses successives	0	7	6	10	18	20 secondes
Pose totale pour chaque plage	0	7	13	23	41	61 »

La durée du développement a été de 58 secondes, au pinceau, avec le révélateur Agfa 12, 1 heure 30 minutes après la dernière pose ; la faible durée du développement permet d'éviter l'apparition du voile chimique ; de la sorte l'absorption de la

lumière par la plage n° 1 est pratiquement nulle. D'ailleurs l'écran reste toujours en place devant la fenêtre F_3 ; la figure 13 montre quelles sont les portions utilisées au cours des poses successives.

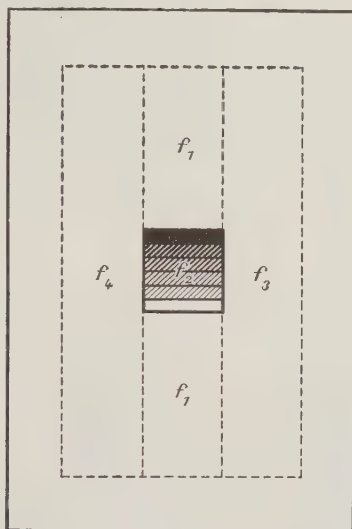


FIG. 13. — Ecran auxiliaire.

V. — ÉTUDE DES CLICHÉS. — EXAMEN AU MICROPHOTOMÈTRE

Description du microphotomètre.

Les clichés sont étudiés avec le microphotomètre enregistreur de Moll. Voici quelques détails concernant cet appareil :

L'écrou mobile d'une vis de précision (pas 1 mm) entraîne le chariot porte-plaque ; l'axe de la vis porte des roues dentées qui sont reliées, par des vis tangentés :

1° au cylindre enregistreur : un jeu d'engrenages permet d'employer diverses amplifications ;

2° au moteur d'entraînement : un jeu de poulies permet diverses vitesses.

J'ai vérifié que la précision des mécanismes est suffisante pour assurer durant tout l'enregistrement une amplification constante. La figure 14 représente le schéma du montage optique.

La source lumineuse est une petite lampe à incandescence Philipps de 4 volts, 25 watts ; elle éclaire une fente F , de dimensions réglables ; un objectif O_1 donne

de F une très petite image F' sur la plaque ; des objectifs O_2 et O_3 donnent de F' une image définitive sur une pile thermoélectrique, constituée par deux fils soudés, dans le vide. Un galvanomètre de Moll reçoit le courant de la pile, ses déviations s'enregistrent sur le cylindre.

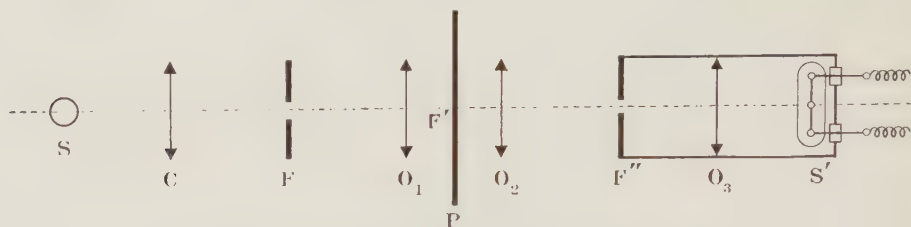


FIG. 14. — Montage optique du microphotomètre Moll.

Erreurs dues à l'enregistrement.

Nous avons déjà vu le rôle de la largeur de la fente exploratrice et de l'amortissement du galvanomètre de Moll ; des erreurs peuvent également s'introduire dans les mesures des ordonnées et des abscisses sur le microphotogramme.

Erreurs sur les ordonnées.

La pile thermoélectrique a pratiquement une sensibilité constante ; mais la source lumineuse du microphotomètre peut varier en intensité. Cette source est une petite lampe à incandescence, alimentée par un accumulateur de 6 volts ; elle subit une dérive lente.

Il est d'abord nécessaire d'opérer avec un accumulateur convenablement chargé et de grande capacité (100 à 150 ampères-heures) ; l'enregistrement ne commence que 1/4 d'heure après l'allumage de la lampe ; néanmoins on peut craindre une variation de potentiel d'environ 1/10 de volt par heure, aux bornes de la lampe ; il faut prévoir une compensation.

J'ai réalisé dans ce but le montage qu'indique la figure 15 ; le potentiel aux bornes de la lampe est mesuré par un galvanomètre de Moll très amorti ; l'échelle est à 1 m, 50 du miroir : 5 mm de l'échelle correspondaient, dans mes mesures, à un déplacement de 1 mm pour le spot photométrique ; je maintenais constante la différence de potentiel, en manœuvrant une résistance variable placée en série sur la lampe. Cette résistance est constituée par une colonne de mercure de l'ordre de 1/10 d'ohm (fig. 15).

Un enregistrement, effectué en l'absence de plaque photographique, montre que l'on assure ainsi la constance de la source ; les fluctuations du spot sur le papier enregistreur sont de l'ordre de 1/10 de millimètre ; il est nécessaire de

prendre un galvanomètre de contrôle dont le couple de torsion soit bien défini ; le galvanomètre Moll, type « Micro », donne toutes satisfactions à cet égard.

Enfin, pour faciliter la lecture des enregistrements et éviter une déformation possible du papier, ou les effets d'une mise en place défectueuse, des traits parallèles, équidistants de 1 mm environ, sont gravés photographiquement sur le film enregistreur, tandis qu'il est encore enroulé sur le cylindre.

Pour cela, le cylindre, détaché du microphotomètre, est porté sur un banc d'optique ; une poulie en ébonite est fixée à son axe ; un petit moteur électrique, fortement démultiplié par une vis tangente, l'entraîne avec une vitesse uniforme de

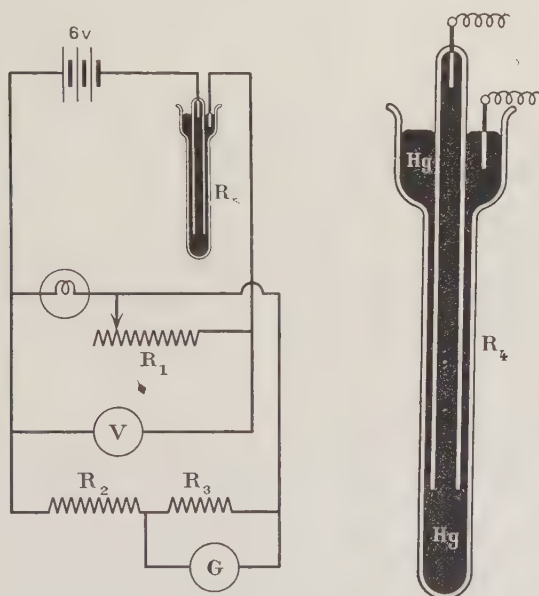


FIG. 15. — Contrôle et réglage de la source.
L, source lumineuse. R_1 , R_2 , R_3 , résistances.
 R_4 , résistance variable à mercure. V, voltmètre.
G, galvanomètre.

1 tour par minute. Le montage optique est représenté sur la figure 16. La source est la plaque carrée d'une lampe pointolite de quelques centaines de bougies ; un condenseur en fait une image sur un diaphragme qui limite la partie utile ; une lentille convergente L_1 projetterait une image de ce diaphragme sur la règle graduée horizontale R, après réflexion sur le miroir sphérique M_1 ; mais une lentille cylindrique L_2 , placée derrière L_1 , étale cette image suivant une sorte de focale, qui éclaire toute la graduation de la règle ; une première focale très étroite se forme en A au voisinage de L_2 . Le miroir sphérique M_1 , légèrement décentré, donne de A une image A' située sensiblement à la même distance de M_1 que A

(centre). La règle R est gravée sur verre et ses traits très fins diffractent la lumière ; au voisinage de A' se trouve un petit miroir de galvanomètre M_2 , atteint uniquement par la lumière diffractée ; il donne une bonne image des traits sur la fente du cylindre enregistreur ; là encore l'objet et l'image sont au voisinage du centre du miroir.

Les traits de la règle se comportent donc comme des sources lumineuses ; leur

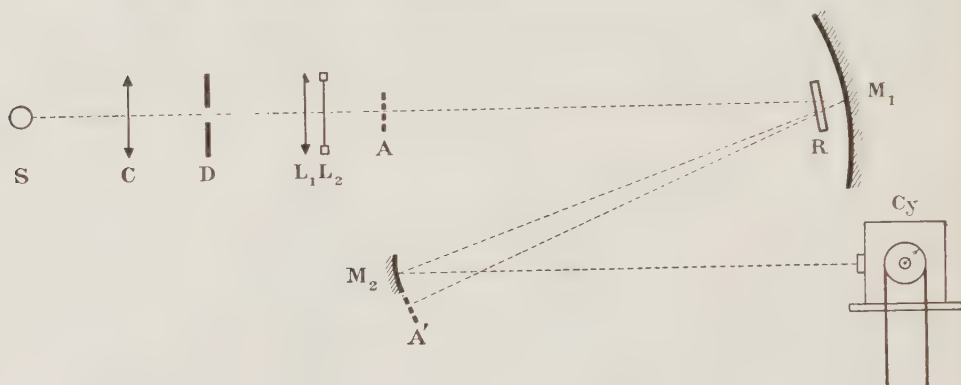


FIG. 16. — Montage optique pour le tracé photographique des repères.

S, source. Cy, cylindre. L_1 , lentille sphérique, $f = 30$ cm.

L_2 , lentille cylindrique, $f = 30$ cm. M_1 , M_2 , miroirs, $f = 50$ cm.

image est une portion de droite éclairée, dont la trace se photographie, sur le papier enregistreur, de la même façon que le spot du galvanomètre de Moll.

Après développement, on obtient sur le papier une série de traits parallèles, qui servent à repérer les ordonnées ; l'image est bonne et ces traits sont équi-

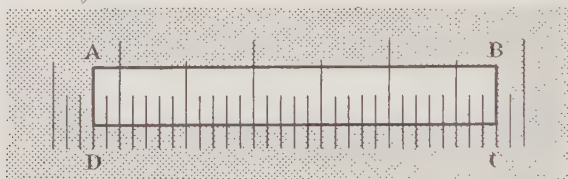


FIG. 17 a.

distants, mais cela même ne serait pas nécessaire ; il suffit d'un simple repérage pour les noircissements.

Pour faciliter la lecture, un trait sur cinq est renforcé ; la figure 17 a indique le procédé utilisé : ABCD représente la fente du cylindre enregistreur ; l'image des traits ordinaires de la règle couvre la moitié de la fente ; toutes les cinq divisions, le trait est plus long et son image couvre toute la fente, en produisant sur le papier enregistreur une impression photographique plus forte.

REMARQUE I. — Le miroir M_1 devrait être argenté sur sa face antérieure pour éviter la lumière parasite réfléchiée par cette face (fig. 17 b). La face avant ayant un rayon de courbure voisin de celui de la face arrière donnerait en effet une image A'' de la focale A au voisinage de M_2 ; la lumière parasite se concentre sur M_2 et brouille le champ.

D'autre part un miroir d'argent poli est coûteux et de conservation difficile.

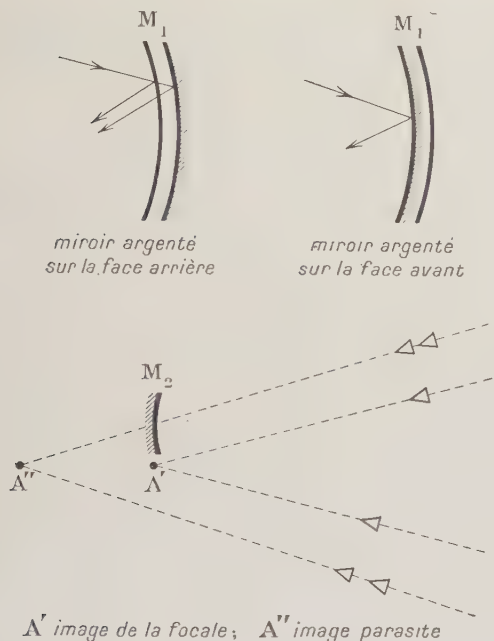


FIG. 17 b.

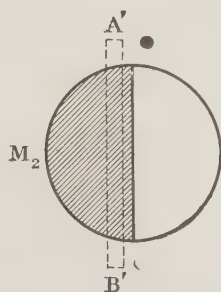


FIG. 17 c.

Pratiquement, j'ai argenté la face arrière d'un objectif biconvexe de lunette; la lumière parasite, réfléchiée par la face antérieure convexe, ne donne pas d'image réelle au voisinage du miroir M_2 ; elle forme à partir de M_1 un faisceau divergent très étalé et, de ce fait, l'éclairement parasite en M_2 est négligeable.

REMARQUE II. — Pour avoir le plus de lumière possible, il faut utiliser au mieux M_2 ; à cet effet M_2 est noirci par un vernis sur la moitié de sa surface; la focale se forme suivant $A'B'$; la lumière diffractée, surtout intense au voisinage de $A'B'$, frappe toute une zone diamétrale du miroir (fig. 17 c).

Erreurs dans la mesure des abscisses.

Le cylindre enregistreur du microphotomètre est placé dans une boîte en fonte; parallèlement aux génératrices se trouve une fenêtre étroite fermée par une len-

tille cylindrique ; l'image de la fente qui éclaire le galvanomètre se forme sur cette lentille, perpendiculairement à sa longueur. La largeur de cette image limite, parallèlement aux génératrices, la tache lumineuse qui trace l'enregistrement ; d'autre part la lentille cylindrique, de très courte distance focale, donne sur le papier une image très étroite du miroir galvanométrique, ce qui limite l'autre dimension de la tache.

Si la lentille et la fenêtre ne sont pas rigoureusement parallèles aux génératrices du cylindre, on a sur l'enregistrement des axes de coordonnées légèrement obliques ; cela pourrait entraîner des erreurs de l'ordre du millimètre dans la mesure des abscisses.

Pour tracer l'axe correct des ordonnées, on peut laisser le cylindre immobile et faire parcourir plusieurs fois au spot la longueur de la fenêtre, par exemple en masquant et démasquant la pile thermoélectrique. Il est préférable d'enregistrer photographiquement sur le papier un système de repères équidistants.

J'utilise généralement l'amplification 50 ; chaque fois que la plaque se déplace de 1 mm, la vis micrométrique d'entraînement fait 1 tour ; sur cette vis est fixée une roue dentée de 50 dents, sur laquelle une vis tangente transmet le couple moteur ; chaque tour de la vis tangente fait avancer la roue de 1 dent ; son axe porte une tige métallique qui, une fois par tour, établit un contact en plongeant dans une cuve à mercure ; à chaque contact un bref éclair illumine une petite lampe de 4 volts, placée juste à côté du miroir galvanométrique ; un trait se grave sur le papier enregistreur ; il y a environ 1 trait par millimètre.

J'ai, d'autre part, monté un jeu d'engrenages qui établit des contacts correspondant aux diverses amplifications ; l'appareil est commandé par une roue dentée, qui se fixe en bout d'arbre sur la tête de la vis micrométrique : un simple commutateur permet de modifier la fréquence des contacts.

Voici comment sont obtenus les éclairages brusques de la lampe auxiliaire : le contact tournant ferme le circuit d'un relais à cadre mobile, en série avec un accumulateur de 2 volts (fig. 18) ; le cadre tourne brusquement et ferme un interrupteur à mercure SRPi qui envoie dans la lampe de 4 volts la décharge d'un condensateur électrolytique de 250 microfarads chargé sous 80 volts ; un potentiomètre (1) permet de régler le potentiel de charge et par suite l'intensité lumineuse ; on peut également sous-volter en permanence la lampe. Le réglage de l'intensité lumineuse dépend de la fréquence des contacts ; un potentiel assez faible suffit si les éclairs se succèdent rapidement, sans que le filament se refroidisse complètement dans l'intervalle de deux éclairs.

(1) Le potentiomètre a une résistance totale de 3.000 ohms ; le curseur n'est jamais à fond de course ; le courant envoyé par la batterie de 120 volts vers la lampe, quand l'interrupteur I est fermé, est négligeable.

Le contact tournant, entraîné par la vis tangente, met en jeu une très petite énergie ; il ferme une force électromotrice de 2 volts sur un cadre de 2 000 ohms ; l'étincelle est très faible ; il suffit d'un peu d'alcool pour protéger le mercure contre l'oxydation.

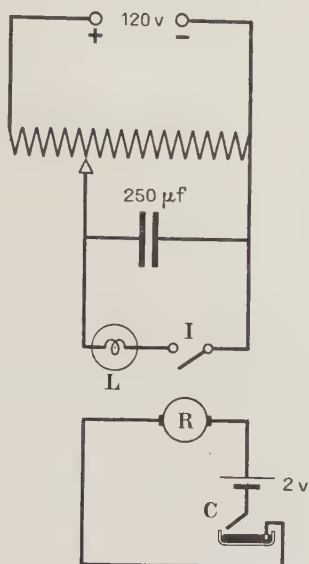


FIG 18. — I, interrupteur SRPI. R, relais galvanométrique. C, contact tournant.

VI. — DISCUSSION GÉNÉRALE DES ERREURS COMMISES DANS LES MESURES

A. Méthode du biréfringent.

Les erreurs peuvent provenir de deux sources :

- 1° la mesure des angles de polarisation ;
- 2° l'imprécision des lectures sur l'enregistrement, par suite du grain de la plaque.

Nous avons vu que le coefficient de réduction a de l'éclairement entre les images A et B est connu avec une erreur relative maximum de $1/400$, soit 2,5 pour 1 000.

L'erreur principale est créée par le grain de plaque, dont les fluctuations provoquent dans l'appréciation de l'ordonnée d'un point sur le microphotogramme une incertitude de $1/4$ de millimètre. *Il est difficile de calculer a priori l'erreur qui en résulte* dans la construction par cheminement de la courbe d'étalonnage. Le tracé des courbes α et β permet en effet de corriger graphiquement les erreurs

accidentelles qui affectent les ordonnées. Je vais, pour préciser le rôle des diverses erreurs commises, faire le calcul dans un cas défavorable.

Je suppose que l'on a utilisé un seul cheminement, sans tracer les courbes α et β , exactement comme pour établir l'étalonnage approché de la plaque.

Je suppose de plus que la courbe d'étalonnage obtenue en portant en abscisses les déviations du spot microphotométrique et en ordonnées le logarithme de l'éclairement soit une droite ; en réalité, ce serait, pour des expositions normales, une courbe en S qui s'écarterait peu de la tangente au point d'inflexion. Une erreur de 1/4 de millimètre sur le microphotogramme entraîne une *erreur relative* constante de 0,5 % dans la mesure de l'éclairement correspondant.

Je considère les images A et B d'un système d'anneaux, bordées de leurs plages de contrôle ; je prends pour unité d'intensité, l'intensité correspondant au noircissement *mesuré* pour le maximum P d'un anneau sur la plage A ; la position de ce maximum sur la courbe A est connue avec une incertitude de 0,5 % ; le point correspondant de la courbe de contrôle est également connu à 0,5 % près ; l'erreur maximum totale sur la position corrigée du point P est 1 % ; autrement dit l'intensité que nous prenons pour unité peut différer de 1 % de l'intensité I_0 effectivement reçue par P.

Le maximum P' de la courbe B a reçu une intensité :

$$I_1 = a I_0, \\ \frac{dI_1}{I_1} = \frac{dI_0}{I_0} + \frac{da}{a} = \frac{10}{1\,000} + \frac{2,5}{1\,000}.$$

D'autre part, une incertitude de 1 % existe sur la détermination directe du point P'.

L'erreur relative totale sera :

$$\frac{\Delta I_1}{I_1} = \frac{10}{1\,000} + \frac{2,5}{1\,000} + \frac{10}{1\,000}.$$

Enfin nous devons déterminer sur la courbe A les points M_1 et N_1 qui ont même ordonnée que P' ; l'erreur maximum définitive commise sur l'intensité en ces points sera :

$$\frac{\Delta' I_1}{I_1} = \frac{10}{1\,000} + \frac{2,5}{1\,000} + \frac{10}{1\,000} + \frac{10}{1\,000} = \frac{10}{1\,000} + \frac{22,5}{1\,000}.$$

Pour le n^e palier d'étalonnage, on aura de même :

$$\frac{\Delta' I_n}{I_n} = \frac{10}{1\,000} + n \times \frac{22,5}{1\,000} \quad I_n = a^n.$$

L'erreur relative augmente quand I_n décroît, mais l'erreur *absolue* est à peu près constante ; il est bien évident que la valeur $I = 0$ serait déterminée avec une erreur relative infinie.

Prenons un exemple numérique ; l'étalonnage a été obtenu par quatre paliers :

$$a = 0,66 \quad a^2 = 0,40 \quad a^3 = 0,29 \quad a^4 = 0,185$$

$$\Delta I_0 = \frac{1}{100}$$

$$\Delta I_1 = 0,66 \times \frac{32,5}{1\,000} = \frac{2,15}{100}$$

$$\Delta I_2 = 0,44 \times \frac{55}{1\,000} = \frac{2,4}{100}$$

$$\Delta I_3 = 0,29 \times \frac{77,5}{1\,000} = \frac{2,25}{100}$$

$$\Delta I_4 = 0,185 \times \frac{100}{1\,000} = \frac{1,85}{100}.$$

Nous avons donc une *erreur absolue* inférieure à 2,5% de l'éclairement du maximum.

J'ai supposé dans ce calcul que toutes les erreurs partielles s'ajoutaient ; le chiffre indiqué concerne donc la limite supérieure de l'erreur et non l'erreur probable.

En réalité, l'erreur est beaucoup plus faible :

1° En effet, la position des points situés au voisinage du sommet des anneaux est connue avec une précision plus grande que 1/4 de millimètre : en ces régions plus opaques de la plaque le grain est beaucoup moins gênant.

2° Nous avons vu que la construction des courbes α et β atténue les erreurs accidentelles dues au grain.

3° On détermine sur chaque palier, non pas un point M ou un point N, mais simultanément le couple MN, ce qui diminue l'erreur commise dans la mesure des ordonnées.

4° Enfin on utilise plusieurs cheminements et on prend la moyenne des courbes d'étalonnage obtenues.

Pratiquement, l'expérience montre que l'écart entre les courbes expérimentales correspondant aux divers anneaux d'une même plaque est au plus 1% de l'intensité maximum.

B. Méthode de l'écran auxiliaire.

Pour évaluer l'ordre de grandeur de l'erreur commise, je prendrai un exemple précis ; je suppose qu'un maximum P des anneaux ait le même noircissement que la plage étalon n° 1. Je prendrai pour unité l'intensité reçue par cette plage.

Je me propose de déterminer avec quelle précision sera connue, sur l'enregistrement des anneaux, l'intensité moitié de l'intensité maximum ; soit M le point des anneaux où l'éclairement a cette valeur. La comparaison de l'intensité reçue par P et de l'intensité unité introduit une erreur relative de 2/100 ; le point de la courbe d'étalonnage où l'intensité est 1/2 est connu avec une erreur absolue de 1/100,

done une erreur relative de $2/100$; la comparaison de la courbe d'étalonnage et de la courbe donnée par les anneaux ajoute, pour la détermination du point M, une erreur relative supplémentaire de $2/100$; le rapport des intensités en M et P sera connu à $6/100$ près, soit une erreur absolue de $3/100$ sur l'intensité du point M. (1)

Ici encore nous avons raisonné en prenant un cas défavorable ; en réalité, le fait que l'on a des *plages* d'étalonnage et non des points, permet d'atténuer les erreurs accidentelles dues au grain de plaque. D'autre part, la précision est encore plus grande, si l'on a pris, pour étalonner l'écran, la moyenne de plusieurs mesures.

Pratiquement, on peut admettre, d'après les résultats expérimentaux, que l'erreur *absolue* totale est au plus $2/100$ de l'intensité d'un maximum.

En résumé, dans les deux méthodes utilisées, les mesures sont entachées d'une erreur absolue à peu près indépendante de l'intensité. Les auteurs évaluent généralement (2) la précision de leurs mesures en centièmes de l'intensité maximum.

La précision est essentiellement limitée par le grain de plaque ; ce grain varie d'un cliché à l'autre pour une même émulsion ; il faut systématiquement rejeter les enregistrements où le grain est anormalement grand.

C. Exemple de mesure photométrique.

Je vais indiquer, à titre d'exemple, l'étalonnage d'un écran auxiliaire par la méthode du biréfringent ; je reprendrai l'écran à six plages n° B 236, dont il a été question.

a) POSES D'ÉTALONNAGE. — L'écran est étalonné dans les conditions mêmes où il sera employé. Il est placé dans le plan de la fente F_3 , diaphragmée par la fenêtre f_2 . Les plages dégradées sont exactement situées au même endroit que dans les conditions de travail : la définition du faisceau, la longueur d'onde, les surfaces optiques traversées sont les mêmes ; l'écran joue, par rapport au système biréfringent, le rôle d'un objet à l'infini, et on peut l'étalonner comme il a été dit pour les anneaux d'interférence.

Voici les poses d'étalonnage :

Plaque n° B 239. — L'appareil est éclairé par la raie rouge du cadmium.

1^{re} POSE : Les plages dégradées sont sur la fenêtre f_2 ; durée de pose, 10 secondes ; $\theta = 39^\circ 02'$.

2^e POSE : L'écran a été déplacé vers la droite ; devant la fenêtre f_2 se trouve maintenant la partie du fond de plaque qui est à gauche des plages dégradées ; la plaque réceptrice a été déplacée de 3 mm vers la droite.

Un écran semi-platiné de densité 0,57 est placé sur le diaphragme D_2 .

(1) Là encore je suppose toutes les erreurs additives et j'obtiens une limite supérieure et non l'erreur probable.

(2) Minkowski. *Zs. für Physik*, 93 (1935), p. 731.

Le polariseur a été tourné de façon que $\theta = 45^\circ$; durée de pose, 10 secondes.

3^e POSE : L'écran platiné, le polariseur restent en place ; l'écran à étalonner et la plaque photographique sont déplacés tous deux vers la gauche ; durée de pose, 10 secondes.

Sur la plaque photographique on observe six plages ; sur le microphotogramme on a six courbes : la courbe « supérieure » correspond à l'image la plus intense des plages dégradées ; la courbe « inférieure » correspond à l'image affaiblie. Les plages de contrôle encadrant l'image intense ont été marquées sur le papier avec un spot enregistreur plus intense ; on peut ainsi distinguer facilement les diverses courbes.

b) Le tableau 1 indique les corrections données par les plages de contrôle ; les ordonnées et les abscisses sont mesurées en millimètres.

L'ordonnée moyenne est $y = 30$; les chiffres indiquent les écarts.

TABLEAU 1.

Abscisse	Image intense			Image affaiblie		
	1 ^{re} plage	2 ^e plage	Moyenne	1 ^{re} plage	2 ^e plage	Moyenne
10- 40	-1	-1	-1	-1 3/4	-1/2	- 9/8
50- 90	-1	-1/2	-3/4	-1 1/4	-1/2	-7/8
100-140	-1/2	0	-1/4	-3/4	0	-3/8
150-190	0	1/4	1/8	0	1/4	1/8
210-240	1/4	1/4	1/4	1/2	3/4	5/8
260-290	0	0	0	0	0	0

L'étalonnage approché a permis de tracer une courbe qui donne, pour une ordonnée quelconque, la correction à faire quand l'écart est de 1 pour l'ordonnée $y = 30$. Ces nombres sont indiqués dans la colonne « facteur de correction » du tableau 2.

Le tableau 2 indique, avant et après correction, les ordonnées correspondant aux plages dégradées.

TABLEAU 2.

Abscisse	Image intense					Image affaiblie			
	N ^o des plages	Ordonnée brute	Ecart pour $y = 30$	Facteur de correction	Ordonnée corrigée	Ordonnée brute	Ecart pour $y = 30$	Facteur de correction	Ordonnée corrigée
10- 40	1	72,0	-1	0,5	72,5	62 1/2	-9/8	0,7	63,3
50- 90	2	70,3	-3/4	0,5	70,7	59 3/4	-7/8	0,8	60,45
100-140	3	67,0	-1/4	0,6	67,15	54 1/2	-3/8	0,9	54,85
150-190	4	59,0	1/8	0,8	58,9	43 1/2	+ 1/8	1,05	43,4
210-240	5	40,0	1/4	1,05	39,75	23	5/8	0,95	22,4
260-290	6	19,25	0	0,9	19,25	7 1/2	0	0,4	7,5

Nous avons donc entre les ordonnées des deux images le tableau de correspondance n° 3, qui permet de dresser le diagramme d'étalonnage (fig. 19 a).

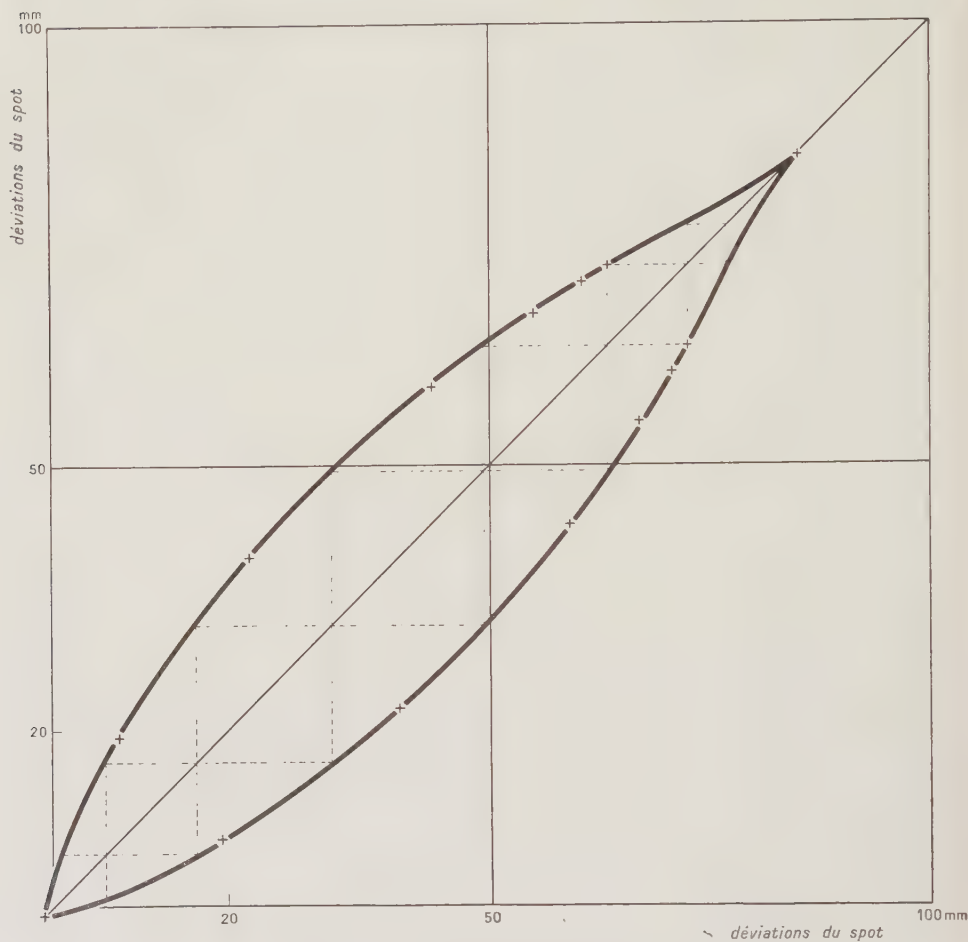


FIG. 19 a. — Diagramme d'étalonnage.

TABLEAU 3.

	No de plages	1	2	3	4	5	6	
Déviation nulle $y = 85$	Image intense	72,5	70,7	67,15	58,9	39,75	19,25	noircissement nul $y = -1$
	Image faible	63,3	60,45	54,85	43,4	22,4	7,5	

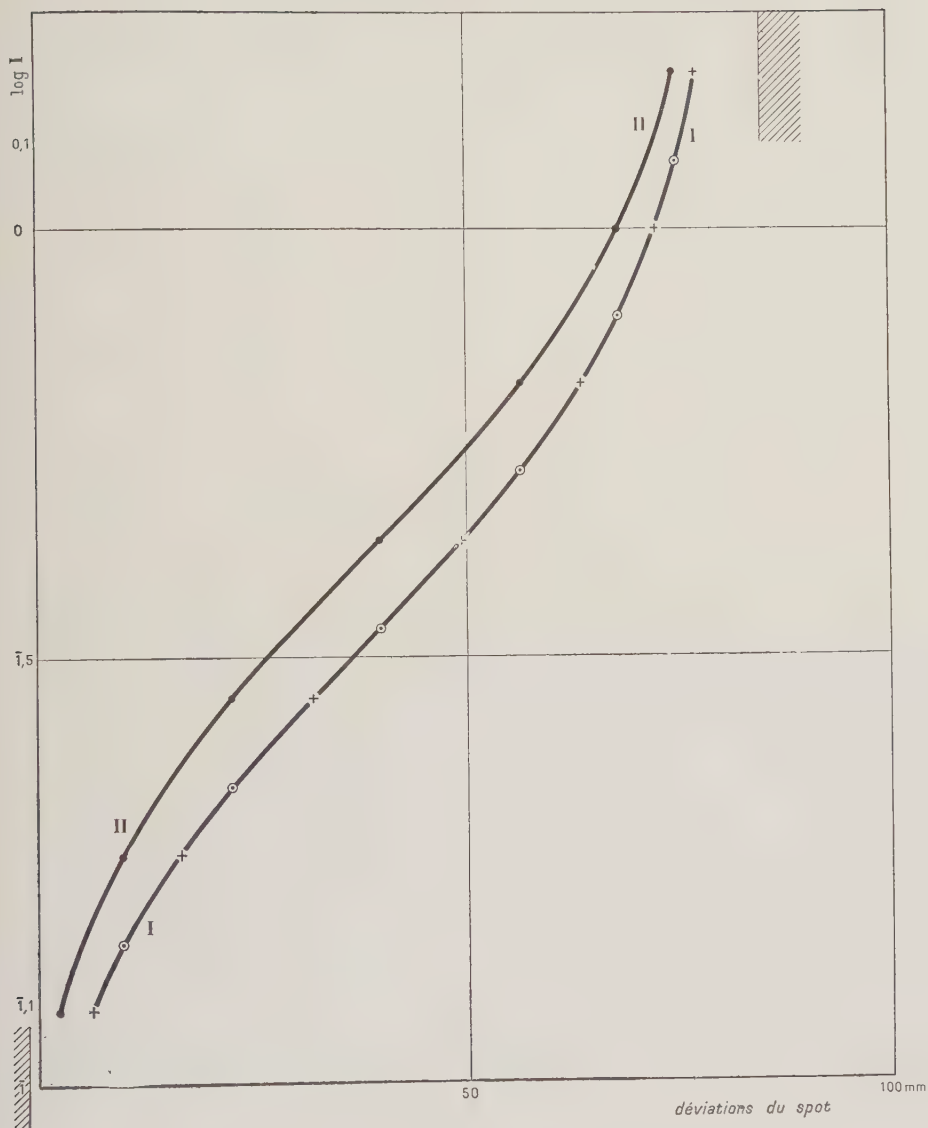


FIG. 19 b. — Courbes d'étalonnage.
 + courbe I. ● courbe II. ○ points de I r appelés sur I.

TABLEAU 4.

Courbe I	77,0	72,5	63,5	49,5	32,0	16,25	6,0
Courbe II	74,75	68,0	56,5	40,0	22,5	9,75	2,5
log I.....	0,182	0	1,818	1,636	1,453	1,271	1,089

Le diagramme d'étalonnage permet d'obtenir par cheminement des courbes d'étalonnage; je donne ici deux courbes I et II (fig. 19 b; tableau 4); les points de II sont rappelés par translation sur I; je prends, pour unité d'intensité, l'intensité correspondant à l'ordonnée 72,5.

La courbe d'étalonnage permet de mesurer le logarithme de l'intensité pour les diverses plages; le tableau 5 donne les résultats.

TABLEAU 5.

Plage	Intensité transmise Unité : intensité de la plage 1			Cellule
	Image intense	Image faible	Moyenne	
1	1	1	1	1
2	0,902	0,906	0,904	0,915
3	0,759	0,762	0,760	0,770
4	0,575	0,568	0,571	0,563
5	0,338	0,342	0,340	0,330
6	0,203	0,203	0,203	0,188

L'image intense et l'image affaiblie donnent des nombres dont l'écart maximum est au plus 0,007; nous sommes bien dans les limites indiquées pour l'erreur, soit 0,010.

La dernière colonne du tableau concerne des mesures faites avec une cellule.

Mesures de contrôle employant une cellule.

Il était intéressant de comparer les résultats donnés par photométrie photographique, avec des mesures obtenues indépendamment; j'ai employé comme récepteur une cellule photoélectrique à vide Philips, sensible à la lumière rouge. La tension d'alimentation est 120 volts; elle est très supérieure à la tension de saturation de la cellule; on évite ainsi les erreurs dues aux variations possibles du potentiel des accumulateurs. Le courant photoélectrique est mesuré par un galvanomètre Chauvin et Arnoux; la résistance du cadre est 3 000 ohms; la résistance critique 80 000 ohms, la période 9,5 secondes; la déviation est de 1 mm à 1 m pour 5×10^{-10} ampères.

La figure 20 indique le montage optique; j'ai cherché à prendre des ouvertures de faisceaux voisines des ouvertures utilisées dans les mesures par le biréfringent. La source est une lampe de projection de 250 watts; une lentille L_1 de 30 cm de distance focale projette une image de la source sur un diaphragme à iris D_2 ; une deuxième image est formée par la lentille de 10 cm L_3 sur le diaphragme d'entrée D_3 de la cellule; en D_3 se trouve un écran rouge en gélatine colorée.

L'écran dégradé à étalonner se trouve sur un chariot porte-plaque placé juste

après L_1 ; un diaphragme D_1 ne découvre que la partie où se trouvent les plages ; la lentille L_2 de 30 cm projette dans le plan d'une fente F une image 4 fois agrandie des plages dégradées ; l'ouverture F est réglée de façon à s'inscrire dans l'image d'une seule plage ; une vis micrométrique déplace le chariot porte-plaque et permet d'étudier successivement les six plages de l'écran sans modifier le faisceau lumineux ; entre chaque mesure, je prends le zéro du galvanomètre. Les flux reçus par la cellule sont mesurés à 1 % près ; la déviation maximum du spot est 20 cm.

Les conditions ne sont pas cependant rigoureusement les mêmes que dans l'éta-

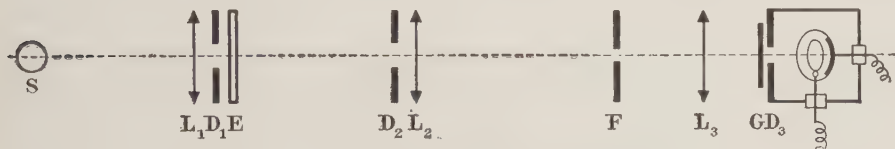


FIG. 20. — Etalonnage des écrans par une cellule.
E, écran à étalonner. G, filtre de gélatine colorée.
Distances focales : L_1 30 cm, L_2 30 cm, L_3 10 cm.

lonnage par le biréfringent ; on a non de la lumière monochromatique, mais une portion de spectre continu ; on analyse une image agrandie des plages et non une image réduite ; les faisceaux ne sont pas exactement définis de la même façon.

Le tableau 5 montre cependant que la concordance entre les mesures par le biréfringent et par la cellule est satisfaisante ; l'écart maximum est 0,015.

J'ai également comparé directement les indications du système glazebrook-wollaston et de la cellule, en utilisant un montage analogue à celui décrit par MM. Bruhat et Chatelain ⁽¹⁾ ; le déplacement d'un biprisme permet d'envoyer sur la cellule successivement les deux faisceaux issus du biréfringent ; là encore la concordance des mesures est satisfaisante, à la précision de la cellule près.

En résumé, la cellule donne avec une assez bonne précision l'étalonnage d'un écran dégradé ; mais la photométrie photographique est préférable, car elle permet d'étalonner l'écran dans les conditions mêmes où il sera utilisé.

(1) Bruhat et Chatelain, *Revue d'Optique*, 12 (1933), p. 6.

DEUXIÈME PARTIE

ÉTUDE DES ANNEAUX A L'INFINI DES LAMES SEMI-ARGENTÉES

Nous avons examiné les méthodes de photométrie photographique qui permettent de mesurer le plus exactement possible la répartition de l'intensité lumineuse dans une figure à l'infini. On peut ainsi étudier photométriquement les anneaux à l'infini des lames semi-argentées et par suite mesurer des largeurs ou des structures de raies.

Dans la deuxième partie de ce travail j'ai appliqué les méthodes précédentes à un cas simple : l'étude de la raie rouge du cadmium émise par les tubes à haute fréquence. Aux faibles différences de marche, la raie peut être considérée comme monochromatique et on doit retrouver la répartition théorique de l'intensité dans les anneaux, telle qu'on la calcule à partir du pouvoir réflecteur. Pour des différences de marche plus grandes, la largeur de la raie provoque une diminution de la netteté des anneaux. Je vais indiquer dans un premier chapitre comment on peut calculer, dans les deux cas, la répartition de l'intensité lumineuse. Je décrirai ensuite les montages concernant les sources, la préparation des semi-argentures, la mesure de leur pouvoir réflecteur, et la stabilisation de la température de l'interféromètre. J'indiquerai enfin les résultats expérimentaux.

I. — GÉNÉRALITÉS SUR LES APPAREILS A ONDES MULTIPLES

Étalon de Perot et Fabry.

La théorie de ces appareils est classique ; je vais en rappeler les résultats.

Considérons un étalon de Perot et Fabry, bien réglé, envoyons sur cet étalon un faisceau de lumière dont le rayon moyen soit normal aux lames ; recueillons la lumière sur un objectif, et observons le phénomène dans le plan focal.

Un point P du plan focal correspond à un faisceau de rayons parallèles, qui a traversé directement les lames. Mais en plus de la partie directement transmise, ce

faisceau cylindrique a donné, par réflexions multiples, une infinité de faisceaux parallèles à une même direction ; ils viennent tous converger au point P après réfraction sur l'objectif. Les réflexions successives introduisent entre deux faisceaux consécutifs une différence de marche constante, correspondant à la traversée dans les deux sens de la lame d'air comprise entre les faces semi-argentées. Cette différence de marche δ ne dépend que de l'angle d'incidence φ des rayons sur les lames. Si D est l'épaisseur de la lame d'air traversée :

$$\delta = 2D \cos \varphi.$$

D'autre part, si l'on prend pour unité l'intensité du faisceau directement transmis et si f_1, f_2 sont les pouvoirs réflecteurs des deux argentures, l'intensité des faisceaux successifs sera :

$$1 \quad f_1 f_2 \quad (f_1 f_2)^2 \quad \dots \quad (f_1 f_2)^n$$

ou, en posant $f^2 = f_1 f_2$:

$$1 \quad f^2 \quad f^4 \quad \dots \quad f^{2n}$$

Nous aurons ainsi, en chaque point P du plan focal, interférence d'une infinité de faisceaux qui présentent une différence de marche constante, et dont l'intensité décroît en progression géométrique ; comme δ ne dépend que de l'angle φ , le phénomène observé sera de révolution autour de la normale aux lames ; on verra dans le plan focal un système d'anneaux circulaires.

On peut calculer facilement l'éclairement en chaque point du plan focal (1) ; si l'on prend pour unité l'intensité d'un maximum, toute la figure d'interférences sera représentée par la formule :

$$(1) \quad J = \frac{1}{1 + \frac{4f}{(1-f)^2} \sin^2 \pi h} \quad \text{avec } h = \frac{\delta}{\lambda} \text{ ordre d'interférence}$$

On aura des anneaux brillants d'autant plus fins et des minima d'autant plus sombres que f sera plus grand.

$$(2) \quad J_{\min} = \frac{(1-f)^2}{(1+f)^2}.$$

Rayons des anneaux.

Soit x le rayon d'un anneau, F la distance focale de l'objectif :

$$\varphi = \frac{x}{F}.$$

(1) Ch. Fabry : Interférences lumineuses, p. 28. *Editions de la Revue d'Optique.*

L'angle φ est au plus de l'ordre du degré ; on peut écrire :

$$\delta = 2D \cos \varphi = 2D \left(1 - \frac{x^2}{2F^2} \right) = h\lambda.$$

Appelons h_0 l'ordre d'interférence au centre ; nous obtenons la relation :

$$(3) \quad \frac{x^2}{2F^2} = \frac{h_0 - h}{h_0}.$$

Il y a maximum quand tous les faisceaux sont en concordance de phase, c'est-à-dire quand :

$$\delta = p\lambda \quad \text{ou} \quad h = p \quad p \text{ entier.}$$

Il y a minimum quand :

$$\sin^2 \pi h = 1 \quad \text{ou} \quad h = p + \frac{1}{2} \quad p \text{ entier.}$$

Les carrés des rayons successifs, correspondant à un maximum ou un minimum, varient donc comme la suite des nombres entiers.

Il est commode, pour la suite de cette étude, de comparer l'étalon de Perot et Fabry à un appareil à ondes multiples dans lequel interfèrent en nombre *limité* des faisceaux *d'égale intensité* (échelon, réseau).

Appareils à nombre limité de faisceaux (1).

Supposons une série de N faisceaux parallèles présentant la même différence de marche δ , variable selon l'inclinaison d'ensemble φ des faisceaux :

$$\delta = f(\varphi).$$

La différence de marche des faisceaux extrêmes est :

$$\delta = (N - 1) f(\varphi).$$

Ces faisceaux seront rassemblés par un objectif en un point P d'un plan focal ; supposons qu'en ce point au temps t l'élongation de la vibration lumineuse soit pour le premier faisceau :

$$e_1 = A \sin 2\pi \Phi.$$

L'élongation pour le deuxième faisceau sera :

$$e_2 = A \sin 2\pi \left(\Phi - \frac{\delta}{\lambda} \right) \quad \text{etc.}$$

(1) Gehrcke : Handbuch der Physikalischen Optik, tome 2, p. 187 (Hansen).
K. Förstering. Zs. f. techn. Ph., 4 (1923), p. 182.

L'élongation résultante s'obtiendra en faisant la somme des élongations partielles :

$$e = A \sum_{n=1}^{n=N} \sin 2\pi \left(\Phi - n \frac{\delta}{\lambda} \right).$$

1° Supposons que $\frac{\delta}{\lambda} = \frac{1}{N}$.

Si l'on construit par le diagramme de Fresnel l'amplitude résultante a , on obtient un contour polygonal fermé :

$$a = 0.$$

Il en sera de même si $\frac{\delta}{\lambda} = \frac{m}{N}$, quand m sera un entier quelconque différent de N .

2° Si, au contraire, $m = N$, toutes les amplitudes s'ajoutent et $a = N A$.

Il en sera de même si $m = h N$, h étant un nombre entier, c'est-à-dire si :

$$\delta = h\lambda.$$

Aux ordres d'interférence h et $h + 1$ se trouveront ainsi deux maxima d'intensité, séparés par $N - 1$ minima nuls et par suite par $N - 2$ maxima secondaires.

Pouvoir de résolution d'un appareil à ondes multiples.

Soit $d\lambda$ le plus petit écart de longueur d'onde que l'instrument permette de mesurer ; le pouvoir de résolution est défini par : $A = \frac{\lambda}{d\lambda}$.

D'après Lord Rayleigh deux radiations λ et $\lambda + d\lambda$ cessent d'être séparées quand le maximum M des anneaux donnés par λ coïncide avec le premier minimum nul m donné par la radiation voisine $(\lambda + d\lambda)$.

Les différences de marche sont évidemment les mêmes pour M et m , ce qui donne :

$$\left(h - \frac{1}{N} \right) (\lambda + d\lambda) = h\lambda ;$$

en négligeant les termes de second ordre, on peut écrire :

$$h d\lambda = \frac{\lambda}{N}.$$

Le pouvoir de résolution est par suite :

$$(4) \quad A = \frac{\lambda}{d\lambda} = Nh.$$

C'est le produit de l'ordre d'interférence par le nombre des faisceaux.

Pouvoir de résolution d'un étalon de Perot et Fabry.

Dans l'étalon Perot et Fabry, il n'y a ni minima d'intensité nuls ni maxima secondaires ; nous allons définir le pouvoir de résolution par analogie avec le cas précédent.

Nous avons admis que deux maxima principaux cessent d'être distincts quand ils sont séparés par une variation de h égale à $a = \frac{1}{N}$; pour la moitié 1,2 N de cet intervalle l'intensité lumineuse tombe à la valeur

$$\alpha = 0,4053$$

en prenant pour unité l'intensité du maximum.

Cherchons pour quelle valeur de h , dans l'étalon de Perot et Fabry, l'intensité J tombe à cette valeur, on obtient, tous calculs faits :

$$\sin \pi h = \frac{1-f}{\sqrt{f}} \times 0,6056.$$

Pour chaque pouvoir réflecteur, nous définissons ainsi un nombre h ; posons :

$$h = p + \varepsilon :$$

p est un nombre entier, ε l'excédent fractionnaire.

Nous admettrons par analogie que deux maxima sont encore séparés quand ils correspondent à une variation de l'ordre d'interférence égale à

$$a = 2\varepsilon.$$

Nous pourrions caractériser chaque étalon semi-argenté par le nombre équivalent N_e de faisceaux d'intensité égale qui donneraient le même pouvoir de résolution ;

$$N_e = \frac{1}{a} ;$$

pour un écartement donné des lames, le pouvoir de résolution sera donc :

$$(5) \quad A = N_e h = \frac{2D}{\lambda} N_e.$$

Le tableau 6 donne la correspondance entre le pouvoir réflecteur et le nombre N_e , les chiffres concernant les fortes argentures sont empruntés à Hansen.

TABLEAU 6.

f	N_e	f	N_e
0,30	1,8	0,84	14,8
0,40	2,6	0,86	17,1
0,50	3,5	0,88	20,2
0,60	5,0	0,90	24,5
0,70	7,3	0,92	31,0
0,75	8,9	0,94	41,8
0,80	11,5		

Définitions.

Je vais définir quelques grandeurs qui interviennent souvent dans les mesures.

On appelle *domaine de dispersion* $\Delta\lambda$ la variation de longueur d'onde qui, à ordre d'interférence égal, décale les anneaux de 1 frange :

$$(6) \quad \begin{aligned} h(\lambda + \Delta\lambda) &= h\lambda + \lambda \\ \Delta\lambda &= \frac{\lambda}{h} = \frac{\lambda^2}{2D \cos \varphi} \approx \frac{\lambda^2}{2D} . \end{aligned}$$

Le domaine de dispersion diminue quand l'écartement des lames augmente. Comparons la limite de résolution au domaine de dispersion :

$$(7) \quad \frac{d\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{1}{A} \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{1}{N_e h} \times h = \frac{1}{N_e} .$$

Le nombre $1/N_e$ indique ainsi la fraction d'interfrange au-dessous de laquelle les raies ne sont plus séparées.

Il est parfois commode d'utiliser la *dispersion angulaire*. Nous avons vu que l'ordre d'interférence est :

$$h = \frac{2D \cos \varphi}{\lambda} .$$

Une variation $d\lambda$ provoque, pour une valeur constante de h , un déplacement $d\varphi$ des anneaux ; on appelle *dispersion angulaire* $\mathcal{O}$ le rapport $\frac{d\lambda}{d\varphi}$:

$$(8) \quad \mathcal{O} = \lambda \operatorname{tg} \varphi \approx \lambda \varphi .$$

La dispersion angulaire ne dépend pas de l'écartement des lames (1) ; elle est proportionnelle au rayon angulaire des anneaux.

(1) Voir Bogros, *Journal de Physique*, 8 (1937), p. 90.

Rôle des diaphragmes.

L'image D'_1 d'un diaphragme qui limite l'ouverture des faisceaux se forme au voisinage de l'interféromètre. Nous supposerons ce diaphragme circulaire. Le faisceau directement transmis s'appuie sur le contour de D'_1 ; les faisceaux successifs sont de même diaphragmés par les ouvertures $D'_2, D'_3, D'_4, \dots$ obtenues en donnant à D'_1 des translations parallèles à la normale aux lames, d'amplitude égale à 2 fois leur écartement, et de sens opposé à celui de la lumière incidente.

A chaque point de la figure d'interférence, correspond ainsi une série de faisceaux cylindriques ayant pour directrices $D'_1, D'_2, D'_3, \dots$

Supposons que leur direction commune fasse un angle φ avec la normale aux lames; les traces de ces faisceaux dans le plan de D'_1 sont des cercles $d'_2, d'_3, \dots$ obtenus en donnant à D'_1 des translations successives parallèles à la trace du plan d'incidence et d'amplitude $2e\varphi$; e désigne la distance des lames de l'interféromètre.

Il existe toujours, après la première lame, un diaphragme réel C; par exemple ce sera la monture même des lames, ou encore la monture de l'objectif qui photographie les anneaux; si ce diaphragme a un rayon R et se trouve à une distance l de D'_1 , les rayons lumineux qui peuvent le traverser sous l'incidence φ sont situés à l'intérieur d'un faisceau cylindrique dont la trace sur le plan D'_1 est un cercle de rayon R ; le centre de ce cercle se trouve à la distance $l\varphi$ du centre O' de D'_1 .

Les calculs que nous avons faits sur la distribution de l'intensité lumineuse et le pouvoir de résolution supposent essentiellement que les faisceaux successifs ont même étendue; il faut se rapprocher le plus possible de ce cas théorique.

Premier cas.

Le diaphragme réel C est plus petit que D'_1 ; je le supposerai, pour simplifier, dans le plan de D'_1 et centré sur lui.

Le diaphragme C laissera passer, dans le cas de rayons normaux, une infinité de faisceaux successifs limités à son contour. Pour des rayons inclinés sur l'axe, le diaphragme C laissera encore passer des faisceaux définis par son contour, jusqu'à ce que l'un des cercles d'_n vienne couper C; à ce moment l'aire utile diminue, et s'annule quand l'un des cercles d'_n devient extérieur à C.

Il faudra donc, en ce cas, prendre un diaphragme D'_1 grand par rapport au diaphragme C; on peut admettre en première approximation que le nombre des faisceaux non perturbés doit être au moins égal au nombre N_e que nous avons précédemment calculé. L'action du diaphragme sera d'autant plus faible que les lames seront plus voisines et le pouvoir réflecteur plus petit.

Le cas examiné se produit quand on utilise des prismes polarisants pour étudier

photométriquement les anneaux. La monture des prismes joue le rôle de diaphragme C. Je n'ai employé cette méthode que pour des argentures légères et de faibles différences de marche.

On peut l'utiliser dans de plus larges limites si l'on désire, non point mesurer la largeur des anneaux, mais comparer les intensités des composantes d'une raie ; en ce cas le diaphragme ne modifie pas le rapport à mesurer ; il diminue simplement le pouvoir de résolution.

Deuxième cas.

Dans mes appareils, la monture de l'objectif est beaucoup plus grande que la monture des lames. Cette dernière joue, s'il n'y a aucun autre diaphragme réel, le rôle de diaphragme C.

Les premiers cercles d'_1, d'_2 , etc. sont contenus en entier dans le cercle C ; les faisceaux correspondants passent intégralement ; ils passent encore partiellement après qu'un cercle d'_n a coupé le cercle C, et sont complètement arrêtés quand d'_n devient extérieur à C.

Il faudra ici prendre un diaphragme D'_1 qui soit plus petit que la monture des lames.

Dans mes mesures C et D'_1 ont respectivement pour diamètre 22 mm et 12 mm ; si la distance des lames est 1 cm et l'angle $\varphi = \frac{4}{1\,000}$ radian, le nombre des faisceaux non perturbés sera :

$$n = \frac{R - r}{2e\varphi} \sim 60.$$

Pour obtenir de grands pouvoirs de résolution, il est nécessaire de prendre de grandes lames interférométriques et d'envoyer en leur centre un faisceau limité par un diaphragme placé *avant* l'interféromètre.

Pouvoir séparateur imposé par la diffraction.

Dans tous les cas, les faisceaux correspondant à un point de la figure d'interférence sont limités par un diaphragme C ou D' ; la trace de ces faisceaux cylindriques sur l'objectif est encore un cercle identique à C ou D' ; soit ρ son rayon ; le pouvoir séparateur angulaire de l'objectif ainsi diaphragmé est donné par :

$$\varepsilon = \frac{0,61\lambda}{\rho} ;$$

Dans l'exemple cité, pour les radiations moyennes du spectre visible :

$$\varepsilon = \frac{1}{6} \text{ minute} \sim \frac{1}{20\,000} \text{ radian.}$$

Nous avons vu que :

$$\frac{d\lambda}{d\varphi} = \lambda\varphi.$$

Le pouvoir de résolution correspondant sera :

$$(9) \quad A = \frac{1}{\varphi \varepsilon}.$$

Cette grandeur est *inversement proportionnelle à la longueur d'onde* ; elle dépend de l'ouverture du diaphragme et de l'angle d'incidence des rayons.

Si $\varphi = \frac{1}{100}$ radian, $A = 2\,000\,000$ (pour l'exemple cité)

La diffraction limite le pouvoir de résolution théorique.

La conclusion est la même qu'au paragraphe précédent : si l'on désire de grands pouvoirs de résolution, il faut non seulement utiliser des argentures fortes et de grandes différences de marche, mais encore disposer de lames de grand diamètre ; il faut de plus étudier uniquement les anneaux voisins du centre.

Pouvoir séparateur imposé par le microphotomètre.

Dans le cas où l'on photographie les anneaux d'interférence, la fente exploratrice du microphotomètre limite le pouvoir de résolution ; il faut réduire sa hauteur, à cause de la courbure des anneaux ; il faut surtout prendre une fente étroite. Soit dl la largeur de l'image de la fente exploratrice sur le cliché ; nous admettrons que deux raies sont séparées, abstraction faite de toutes les autres causes limitant le pouvoir séparateur, si leurs images sont distantes d'au moins dl . L'écart angulaire correspondant est :

$$\varepsilon = \frac{dl}{F},$$

F distance focale de l'objectif qui photographie les anneaux. Le pouvoir de résolution sera comme plus haut :

$$(10) \quad A = \frac{1}{\varphi \varepsilon} = \frac{F}{\varphi dl}.$$

Si, comme précédemment, $\varphi = \frac{1}{100}$ radian, $F = 50$ cm et $dl = \frac{1}{20}$ mm, nous obtenons :

$$A = 1\,000\,000.$$

Le grain de plaque ne permet pas de diminuer trop fortement les dimensions de la fente. Si l'on désire augmenter le pouvoir de résolution imposé par le micro-

photomètre, il faut augmenter la distance focale de l'objectif et utiliser seulement les anneaux centraux.

Influence des variations de température et de pression sur la position des franges.

1^o Influence de la température.

Le pouvoir de résolution de l'appareil introduit une incertitude $d\lambda$ dans la mesure d'une longueur d'onde :

$$d\lambda = \frac{\lambda}{\Lambda}.$$

Je vais déterminer pour quelle variation dt de la température le déplacement des franges est le même que pour une variation de la longueur d'onde égale à la limite de résolution $d\lambda$: il faudra assurer la constance de la température au moins à dt près.

La différence de marche de deux faisceaux est

$$\delta = 2D \cos \varphi = \frac{h \lambda_0}{n},$$

λ_0 , longueur d'onde dans le vide ; n , indice de réfraction de l'air

$$(11) \quad 2 D n \cos \varphi = h \lambda_0.$$

La variation $d\lambda$ déplace l'anneau de la distance angulaire $d\varphi$:

$$d\varphi = \frac{d\lambda}{\lambda \operatorname{tg} \varphi} = \frac{1}{\Lambda \operatorname{tg} \varphi},$$

Λ , pouvoir de résolution.

Calculons la variation dt qui provoque le déplacement angulaire $d\varphi$; l'équation (11) donne par différentiation :

$$n \cos \varphi \frac{dD}{dt} dt + D \cos \varphi \frac{dn}{dt} dt - D n \sin \varphi d\varphi = 0.$$

Soit β le coefficient de dilatation linéaire du support des lames, α le coefficient de dilatation des gaz :

$$\frac{dD}{dt} = D\beta \quad \frac{dn}{dt} \propto \dots (n-1)\alpha.$$

On a finalement, en remarquant que n est peu différent de 1, et φ voisin de zéro :

$$(12) \quad dt = \frac{1}{\Lambda} \frac{1}{\beta - \alpha(n-1)}.$$

EXEMPLE: pour un pouvoir réflecteur 0,84 et un ordre d'interférence 100 000, il faudra assurer la constance de la température au moins à 1/15 de degré près pour un support en acier.

Certains métaux invars permettent d'annuler pratiquement la quantité $\beta - \alpha (n - 1)$.

2^e Influence de la pression.

Nous allons différencier par rapport aux variables p et φ les deux membres de l'équation :

$$2 D n \cos \varphi = h \lambda \quad n \text{ est fonction de } p.$$

On a, tous calculs faits :

$$(13) \quad dp = \frac{p}{(n-1) A}.$$

Dans l'exemple précédent, il faudrait une variation de 1,7 mm de mercure pour produire le même déplacement qu'une variation de température de 1/15 de degré.

Les valeurs trouvées pour dt et dp varient en raison inverse de l'ordre d'interférence.

Nous pouvons poser différemment le problème, et chercher quelle variation dt ou dp déplace les anneaux d'une *fraction donnée* $1/q$ de l'interfrange.

La relation (7) permet de transformer facilement les équations (12) et (13). On obtient :

$$(14) \quad \left\{ \begin{array}{l} dt = \frac{1}{q h} \frac{1}{\beta - \alpha (n - 1)} \\ dp = \frac{1}{q h} \frac{p}{n - 1} \end{array} \right.$$

II. — VARIATION DE LA NETTETÉ DES ANNEAUX AVEC LA DIFFÉRENCE DE MARCHE

Nous supposons que la source donne une raie monochromatique, élargie par effet Doppler-Fizeau; aux faibles différences de marche, les interférences présenteront l'aspect théorique; mais pour des distances croissantes des lames, les diverses parties de la raie donneront des systèmes d'anneaux qui ne seront plus exactement en coïncidence; les franges paraîtront s'élargir et se brouiller.

Largeur des anneaux.

Considérons les anneaux donnés par une radiation λ .

Prenons pour unité d'intensité l'intensité maximum d'un anneau ; l'ordre d'interférence au maximum est p ; à l'intensité $1/2$ correspondent deux points M et N ; soient $\lambda - \frac{d\lambda}{2}$ et $\lambda + \frac{d\lambda}{2}$ les longueurs d'onde qui, pour le même ordre d'interférence p , donneraient des maxima d'intensité en M et N.

L'intervalle de longueur d'onde $d\lambda$ est appelé largeur de l'anneau.

1^o *Largeur de l'anneau pour une radiation rigoureusement monochromatique.*

I) Nous avons vu que la distribution de l'intensité lumineuse est donnée par la formule :

$$(1) \quad J(h) = \frac{1}{1 + \frac{4f}{(1-f)^2} \sin^2 \pi h}.$$

Le maximum a lieu pour $h = p$ entier.

L'intensité sera réduite à $1/2$ pour

$$\begin{aligned} \frac{4}{(1-f)^2} \sin^2 \pi h &= 1 \\ \sin \pi h &= \frac{1-f}{2\sqrt{f}}. \end{aligned}$$

Soit $h = p \pm \frac{\varepsilon}{2}$ la solution de cette équation : la largeur de l'anneau sera donnée par

$$(15) \quad d\lambda = \varepsilon \frac{\lambda}{h}.$$

II) Nous allons calculer une autre expression de la formule (1). Posons :

$$(16) \quad \frac{4f}{(1-f)^2} = 4a \quad 2\pi h = 2\pi p + \gamma \quad (p \text{ entier}).$$

L'équation (1) devient :

$$J(\gamma) = \frac{1}{1 + 4a \sin^2 \frac{\gamma}{2}}.$$

Au voisinage du maximum, γ est petit et l'on peut écrire :

$$(17) \quad J(\gamma) = \frac{1}{1 + a \gamma^2}.$$

Cette formule permet de calculer la largeur de l'anneau à 1 % près, tant que la valeur γ correspondante est inférieure à 0,5.

Au delà, la valeur $J(\gamma)$ calculée par la formule (17) est trop faible. Pour des pouvoirs réflecteurs élevés, l'intensité tombe pratiquement à zéro pour des valeurs de γ bien inférieures à 0,5, et la formule (17) peut absolument remplacer l'expression (1) dans les calculs.

La demi-largeur de l'anneau, exprimée en unités angulaires, est alors :

$$(18) \quad \Delta\gamma = \frac{1-f}{\sqrt{f}}.$$

La largeur en longueurs d'onde s'écrit :

$$(19) \quad d\lambda = 2 \Delta\gamma \times \frac{\lambda}{2\pi h} = \frac{\Delta\gamma}{\pi} \frac{\lambda^2}{2D} = \frac{1-f}{\sqrt{f}} \frac{\lambda^2}{2\pi D}.$$

2° *Largeur d'un anneau dans le cas d'une raie perturbée par effet Doppler-Fizeau* (1).

Par suite de l'effet Doppler-Fizeau la raie n'est pas rigoureusement monochromatique; l'intensité lumineuse est représentée en fonction de la fréquence par une courbe en cloche; soit ν le nombre d'ondes en cm^{-1} qui correspond au maximum de cette courbe, pris pour unité d'intensité.

L'intensité lumineuse pour la fréquence $\nu + \eta$ sera donnée par la formule

$$J(\eta) = e^{-\frac{\eta^2}{p^2}}.$$

La largeur vraie de la raie sera par suite :

$$(20) \quad \nu = 2\sqrt{\log_e 2} \quad p \quad (\text{en cm}^{-1}).$$

En un point M de la figure d'interférences l'intensité des anneaux pour la radiation $\nu + \eta$ est :

$$J = \frac{1}{1 + a\gamma^2}$$

avec $\gamma = 4\pi D (\nu + \eta) \cos \varphi - 2p\pi$, p entier,

l'unité d'intensité étant l'intensité maximum du système d'anneaux de la raie $\nu + \eta$.

L'intensité totale au point M sera :

$$J_M = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-\frac{\eta^2}{p^2}}}{1 + a\gamma^2} d\eta.$$

(1) Burger et van Cittert, *Zs. für Physik*, 44 (1927), p. 58.

Posons maintenant :

$$\mu = 4\pi D \nu \cos \varphi - 2p\pi \quad x = 4\pi D r_1 \cos \varphi \quad q = p - 4\pi D \cos \varphi$$

L'angle φ est très petit, on peut écrire :

$$dx = 4\pi D d r_1.$$

L'expression devient :

$$J_M = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\left(e^{-\frac{x^2}{q^2}}\right) \times \frac{1}{4\pi D}}{1 + a(\mu + x)^2} dx.$$

A un facteur près, nous pouvons écrire :

$$J_M = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-\frac{x^2}{q^2}}}{1 + a(\mu + x)^2} dx.$$

Soit j la 1/2 largeur angulaire imposée par l'appareil ; $j^2 = \frac{1}{a}$,

$$(21) \quad J_M = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-\frac{x^2}{q^2}} dx}{1 + \left(\frac{\mu + x}{j}\right)^2}$$

Le calcul de cette intégrale a été réalisé graphiquement par Burger et van Cittert ; on obtient entre la 1/2 largeur mesurée m , la 1/2 largeur imposée par l'interféromètre j , et la 1/2 largeur vraie ν les relations :

$$(22) \quad \left\{ \begin{array}{ll} m^2 = j^2 + 2,15 \nu^2 & \text{si } \nu \ll j \quad (1) \\ m = 0,80 j + 0,81 \nu & \text{si } 0,5 < \frac{\nu}{j} < 1 \quad (1) \\ m = 0,64 j + 0,98 \nu & \text{si } 1 < \frac{\nu}{j} < 3 \quad (2) \end{array} \right.$$

Minkowski et Bruck ⁽²⁾ ont indiqué un procédé de calcul pour l'intégrale (21).

Un changement de variables permet de ramener le calcul de J au calcul d'une fonction Ψ pour laquelle Born ⁽³⁾ a donné des tables, et des développements en série :

$$J = \sqrt{\pi} q \psi \left(\frac{\mu}{j}, \frac{q}{j} \right).$$

(1) Burger et van Cittert. *Zs. für Phys.*, 44 (1927), p. 58.

(2) Minkowski et Bruck. *Zs. für Phys.*, 95 (1935), p. 300.

(3) Born : *Optik*, p. 486 (1933).

L'expérience indiquera pour les anneaux une $1/2$ largeur

$$\mu = m$$

définie par :

$$\psi\left(\frac{m}{j}, \frac{q}{j}\right) = \frac{1}{2} \psi\left(0, \frac{q}{j}\right).$$

Minkowski donne la courbe représentant ν/m en fonction de j/m .

3° *Largeur de l'anneau dans le cas où intervient seulement la largeur naturelle de la raie.*

La distribution de l'intensité dans la raie est alors

$$(23) \quad J = \frac{1}{\frac{\nu^2}{4} + (\nu - \nu_0)^2}.$$

L'intégrale J est calculable ; on obtient :

$$m = j + \nu.$$

4° *Répartition de l'intensité dans les anneaux dans le cas général.*

La distribution de l'intensité dans la raie sera :

$$J(\nu) = f(\nu_0 + \tau_1).$$

L'intensité en un point de la figure d'interférence sera donnée par l'intégrale :

$$(24) \quad J = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(x) dx}{1 + 4a \sin^2(\mu + x)}.$$

III. — RÉALISATION DES INTERFÉRENCES

1. La source.

La source lumineuse, particulièrement intense, est un tube à gaz raréfié, excité en ondes courtes entretenues.

Ces sources et l'oscillateur sont du type décrit il y a quelques années par Esclangon (1). Les lampes fonctionnent avec une grille négative et donnent des oscilla-

(1) Esclangon. *Revue d'Optique*, 11 (1932), p. 399.

tions du type C, avec un bon rendement énergétique.

La longueur d'onde est environ de 12 mètres : avec le poste utilisé, les tubes émettent à peu près uniquement les raies d'arc.

J'utilise généralement des tubes à vapeur de cadmium ; leur fonctionnement est stabilisé par l'adjonction d'argon sous une pression de quelques dixièmes de millimètre de mercure ; à froid, on observe la décharge dans le gaz rare ; à chaud, quand la tension de vapeur du métal est suffisante, le spectre ne montre plus que les raies du cadmium. La décharge dans le gaz rare suffit généralement à produire l'échauffement du tube ; on peut l'accélérer en l'exposant quelques secondes à la flamme d'un chalumeau.

L'oscillateur.

L'oscillateur (fig. 21) est formé de deux lampes E 756 groupées en montage symétrique de Mesny. Les filaments sont chauffés en parallèle par un courant alternatif de 15 ampères sous une tension de 16 volts. Les plaques sont portées à un potentiel de 2 000 volts ; le fil de retour du circuit-plaque débite 200 milliampères.

Le chauffage et la tension sont fournis par une boîte d'alimentation, qui redresse la haute tension au moyen de quatre kénotrons VH2 montés en pont ; un condensateur de $2\mu\text{f}$ atténue les ondulations du courant redressé.

Le circuit oscillant est relié aux plaques ; la bobine de self-induction comporte huit spires de 6,5 cm de diamètre et a 10 cm de longueur ; un condensateur de quelques centimètres aux bornes de l'enroulement diminue le courant de haute fréquence sur les connexions de plaque. La self de grille est formée d'une seule spire de 16 cm de diamètre. Les points milieux I et J des deux enroulements sont reliés respectivement à la source de haute tension et à une résistance de polarisation de 4 000 ω , shuntée par un condensateur (1/10 000 μf), qui la protège contre les fuites du circuit de haute fréquence.

Lorsque le poste fonctionne à un régime poussé, les fuites de haute fréquence de la grille vers le filament peuvent provoquer un échauffement dangereux du passage de l'électrode de grille dans le verre des lampes ; dans ce circuit peuvent de plus se produire des ondes de fréquences plus grandes que l'onde fondamentale ; pour éviter l'éclatement du verre, j'ai relié la borne-grille à une borne-filament, par une résistance de 2 000 ohms qui shunte la capacité filament-grille ; on empêche cette résistance de modifier la polarisation de la grille, en intercalant en série un condensateur de 1/10 000 μf ; l'expérience montre que, dans ces conditions, les lampes sont protégées contre tout accident. La figure 21 indique la place des appareils de mesure : les appareils à cadre mobile sont protégés contre le courant de haute fréquence par des condensateurs de shunt.

Un voltmètre et un ampèremètre sont placés sur l'arrivée générale du courant alternatif 110 volts, 50 périodes.

Un voltmètre et un ampèremètre surveillent le chauffage ; un milliampèremètre donne le courant continu de grille.

Un ampèremètre indique le courant continu du circuit des plaques ; un ampèremètre thermique, en série avec le précédent, donne le courant efficace ; quand le poste est bien réglé, les fuites du courant de haute fréquence sont négligeables et les indications de ces deux appareils concordent. Enfin la tension anodique moyenne est mesurée par un milliampèremètre, en série avec une résistance de 2 mégohms en fil de cuivre bobiné.

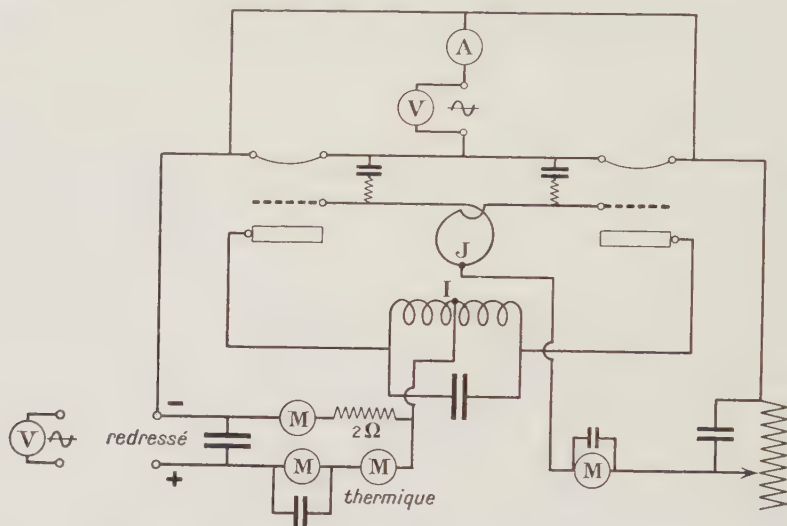


FIG. 21. -- Montage de l'oscillateur et appareils de mesure.
V, voltmètre. A, ampèremètre. M, milliampèremètre.

RÉGLAGE DE L'OSCILLATEUR. — Le réglage se fait par tâtonnements ; il faut choisir, entre la grille et la plaque, un couplage convenable, dont l'importance dépend des tubes à illuminer ; le point essentiel est le réglage des prises médianes J et I sur le circuit de grille et surtout sur le circuit de plaque ; il est commode de faire ce réglage en utilisant des tubes de plus en plus difficiles à illuminer ; ces tubes sont placés au centre des spires du circuit oscillant. J'ai utilisé souvent la série : néon, hélium, brome, cadmium.

Préparation des tubes.

a) INSTALLATION A VIDE. — Les figures 22 et 23 montrent la disposition des tubes ; l'installation est faite avec des pièces de pyrex, les cannes de raccordement ont en moyenne 2 cm de diamètre.

Une pompe double à palettes A, de la Compagnie Générale de Radiologie, assure le vide primaire ; le vide secondaire est créé par une pompe B à condensation

de mercure; une jauge de Mac Leod permet la mesure des pressions à 0,001 mm de mercure près.

Les vases V_1 et V_2 s'opposent aux remontées d'huile venant de A ou aux rentrées de mercure vers A, en cas de rupture d'une canalisation.

La pompe à mercure est reliée au tube à vider T (fig. 23) par deux pièges à air liquide P_1 et P_2 ; ce dernier est placé après le dernier robinet, et protège T contre les vapeurs que pourraient émettre les rodages graissés; les robinets R_7 et R_8 permettent d'intercaler sur la canalisation une colonne de fils de cuivre amal-

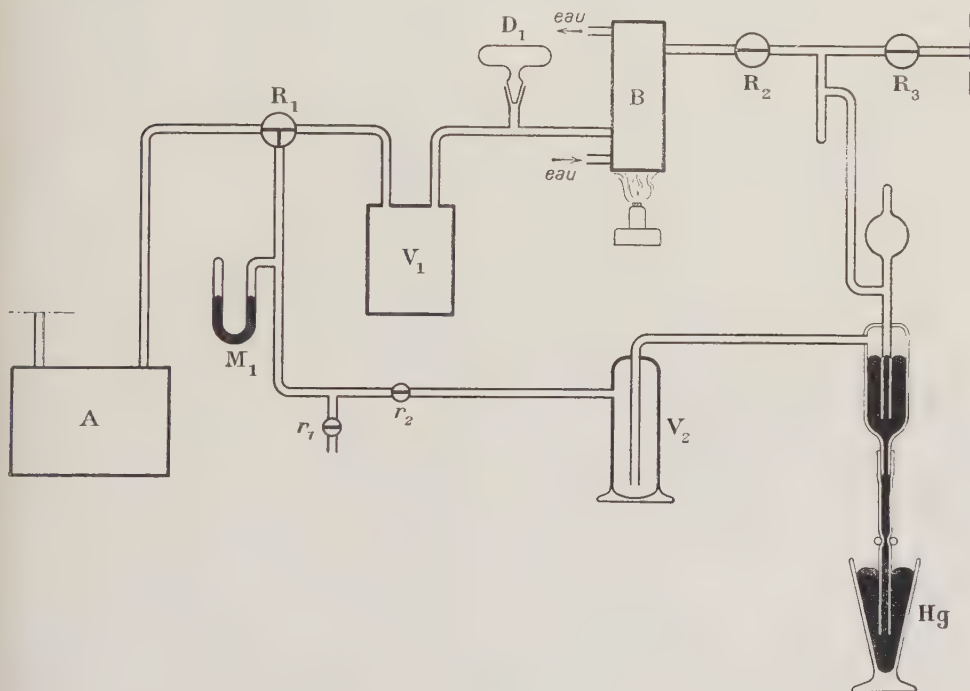


FIG. 22. — Installation à vide : pompes et jauge.

gamé; on peut ainsi protéger le mercure de la pompe quand on a à manipuler des corps comme le brome ou l'iode.

Le ballon B de 1 litre environ augmente le volume de la canalisation; son rôle est d'empêcher, quand R_8 est fermé, une absorption trop rapide du gaz par les parois.

Le robinet R_6 commande les entrées de gaz; il est shunté par un tube capillaire, qui permet des entrées lentes; on peut admettre dans la canalisation, soit des gaz rares contenus dans des ampoules de 1 litre B_2 et B_3 , soit des gaz pris dans un tube industriel à gaz comprimé par le jeu de la cuve à mercure H.

Enfin le robinet R_5 fait communiquer la canalisation avec la cloche d'un appareil à argenture, qui sera décrit plus loin.

b) PRÉPARATION D'UN TUBE CADMIUM-ARGON. — Les tubes ont la forme de cylindres de 4 cm de diamètre et de 8 cm de longueur terminés par deux demi-boules ; ils sont reliés à l'installation à vide par une canne de pyrex de 25 cm de longueur, qui porte une petite tubulure latérale t fermée à son extrémité libre (fig. 23) ; on fait tomber en t quelques grammes de cadmium pur, puis on scelle le tube sur l'installation à vide. Les parois renferment toujours des gaz occlus et en particulier de la vapeur d'eau ; on voit apparaître au début de la décharge la lumière blanche des bandes OH, puis la couleur rouge des raies de l'hydrogène. Le

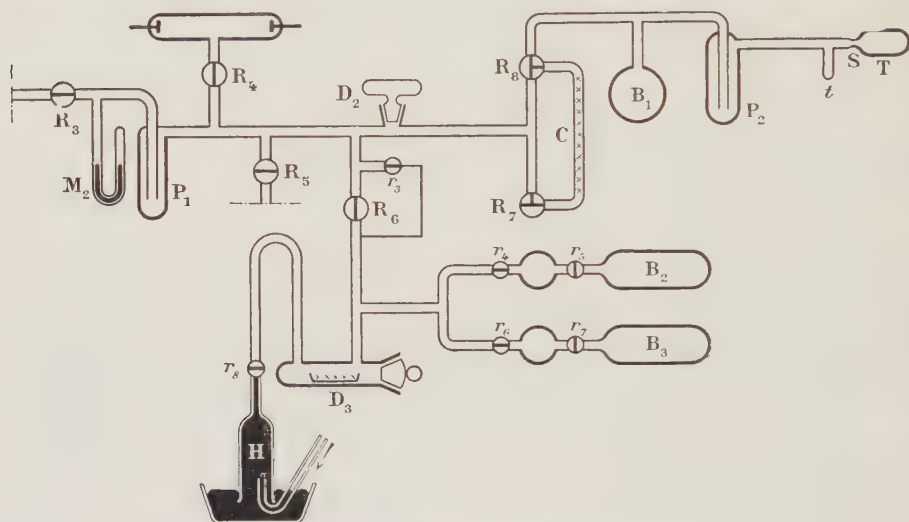


FIG 23. — Installation à vide : rentrées de gaz.

meilleur moyen de dégazer les parois est la décharge en haute fréquence elle-même ; je la fais passer pendant le fonctionnement des pompes à vide, jusqu'à extinction complète : on voit alors une fluorescence rose se produire sur le pyrex ; je fais ensuite après avoir fermé R_3 rentrer de l'argon, jusqu'à ce que le tube présente un maximum d'éclat (quelques dixièmes de millimètre de mercure pour la pression). Après 10 minutes de fonctionnement, j'ouvre R_3 et je fais un vide aussi poussé que possible ; l'opération se répète ensuite au même rythme durant 1 ou 2 heures.

Finalement, dans le tube T bien vidé, je fais distiller le cadmium contenu en t ; j'ad mets alors de l'argon sous une pression de quelques centièmes de millimètre de mercure et je scelle. Les tubes fonctionnent régulièrement, même 1 ou 2 années après leur préparation.

c) PRÉPARATION D'UN TUBE A HÉLIUM. — L'opération est exactement la même que la précédente, mais il faut surveiller particulièrement le dégazage :

la moindre trace d'hydrogène gêne considérablement l'illumination de l'hélium.

2. Les argentures.

A. Préparation des argentures.

CLOCHE A ARGENTURE. — Les lames de l'interféromètre sont recouvertes par pulvérisation cathodique d'une couche semi-transparente d'argent.

La figure 24 indique la disposition de l'appareil ; une première cloche C à bords

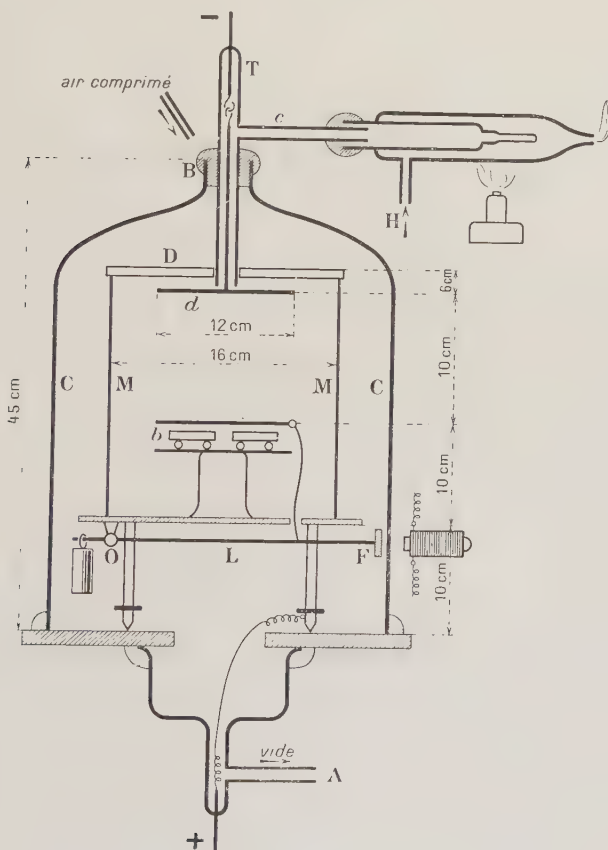


FIG. 24. — Cloche à argenture.

simplement dressés est mastiquée sur une platine en verre ; l'emploi de mastic mou Vacoplast de la Compagnie Générale de Radiologie permet de manœuvrer facilement la cloche ; le vide est établi par la tubulure A, reliée à l'installation à vide déjà décrite ; à l'intérieur de la cloche C se trouve une deuxième enceinte,

qui protège les pièces à argenter des vapeurs que pourrait émettre le mastic ; un manchon de pyrex M est posé sur une table en aluminium, métal que le passage de la décharge ne pulvérise pas ; M est fermé par un disque de pyrex D simplement posé. A la partie supérieure B de la cloche est mastiqué à la picéine un tube de pyrex T, qui pénètre dans la deuxième enceinte ; ce tube amène un courant continu et réglable d'hydrogène pur fourni par un osmorégulateur au palladium.

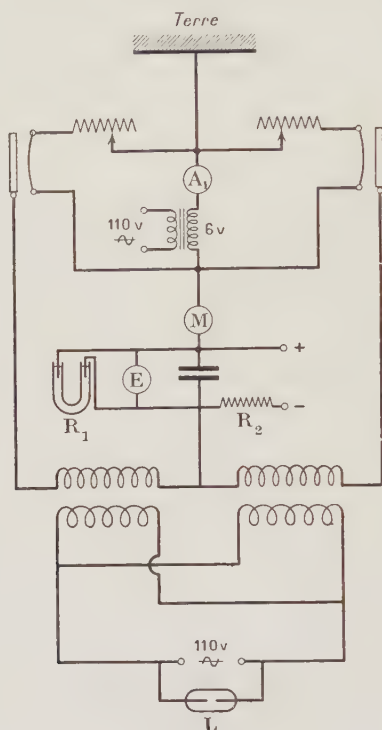


FIG. 25. — Tension d'alimentation de l'appareil à argenter.

A, ampèremètre 10 A. M, millampèremètre, 50 mA.

E, voltmètre électrostatique, 3 000 V.

R₁, résistance liquide, 1 Ω . R₂, 2 000 ω .

L, lampe témoin.

A l'intérieur du manchon M se trouve une table de verre sur laquelle sont fixées des tiges cylindriques, qui servent de support aux lames à argenter.

La table d'aluminium est reliée à l'anode ; la cathode est un disque d'argent spectroscopiquement pur *d*, porté par une tige d'aluminium qui, placée dans l'axe du tube T, va s'accrocher à une électrode de tungstène située au sommet de ce tube.

L'appareil est facilement démontable : quand on soulève la cloche C, on entraîne les disques D et *d* ; on peut ensuite décrocher *d*, et libérer D.

Ceci permet un nettoyage facile des parois après chaque argenture: le métal ne s'est déposé que sur les faces intérieures de M et D et sur la table de verre.

SOURCE DE TENSION CONTINUE. — La figure 25 indique le schéma du poste d'alimentation de la cloche à argenture; des transformateurs, alimentés sous un courant alternatif de 110 volts, 50 périodes, fournissent, par l'intermédiaire de deux kénotrons, du courant redressé, sous une tension qui peut atteindre 2 500 volts.

Une résistance R_2 , en série sur le circuit haute tension, stabilise la décharge et empêche la formation d'étincelles dans la cloche.

MARCHE D'UNE OPÉRATION. — Avant chaque argenture, l'appareil est démonté. Les surfaces en verre de l'enceinte intérieure et les lames à argenter sont soigneusement nettoyées par lavage à l'acide azotique, à l'ammoniaque et à l'eau distillée. Quand les surfaces sont sèches, je monte à nouveau l'appareil; les lames à argenter sont recouvertes d'une feuille protectrice de mica. Je fais alors le vide en laissant passer la décharge; le milliampèremètre M fonctionne comme indicateur de vide; son courant décroît lentement, car durant le début de l'opération les gaz occlus dans le verre se dégagent; quand le vide est suffisamment poussé, le milliampèremètre n'indique plus que le courant de fuite de la résistance qui décharge l'électromètre; je fais alors rentrer un courant régulier d'hydrogène et je maintiens la décharge pendant quelques dizaines de minutes. Le dégazage de la cloche exige au total environ 1 heure; quand il est terminé, on fait à nouveau un vide poussé, puis on rétablit l'arrivée d'hydrogène de façon à avoir au voisinage de la cathode 6 à 7 cm d'espace obscur.

PRÉPARATION D'UNE SEMI-ARGENTURE LÉGÈRE. — La lame de mica, durant l'opération précédente, a protégé les surfaces à argenter: les premières portions d'argent pulvérisé sont salies par les impuretés superficielles de la cathode et par les traces d'oxygène que renferme la cloche. Quand le dégazage est terminé, je fais tomber la feuille de mica; cette feuille est reliée par un crin souple à un levier L terminé par une plaque de fer doux F; au moyen d'un électroaimant extérieur à la cloche, je fais basculer F, qui entraîne la feuille de mica.

Il suffit alors de faire passer la décharge pendant plusieurs minutes pour obtenir de bonnes semi-argentures; il faut simplement ne pas employer des tensions de décharge trop élevées, ce qui pourrait abîmer les lames.

Par exemple sous 1 800 volts, un courant de 17 milliampères a donné au bout de 18 minutes des argentures de pouvoir réflecteur 0,51.

Ces couches d'argent, vues par réflexion, ne présentent aucun défaut; par transmission, les lames paraissent franchement bleues; la présence accidentelle d'oxygène dans la cloche provoquerait la formation de couches d'argent rougeâtres et moins bien réfléchissantes.

PRÉPARATION D'UNE ARGENTURE A FORT POUVOIR RÉFLECTEUR. — Au cours de l'argenture, on peut observer, à travers les parois, l'aspect des lames, en regardant l'image d'une lampe à incandescence, après transmission ou réflexion par la couche semi-argentée ; pendant que l'opération se prolonge, on constate que les lames deviennent de plus en plus opaques et réfléchissantes ; mais, après $3/4$ d'heure ou 1 heure de fonctionnement, on observe l'apparition rapide d'un voile blanchâtre sur l'argenture. Ce voile n'est point un défaut superficiel, toute la couche d'argent présente un aspect dépoli, seule une couronne étroite sur les bords garde encore un bon pouvoir réflecteur et une grande opacité.

La cause de cet accident paraît être l'élévation de la température pendant le passage de la décharge : on peut songer soit à une réorganisation de la couche d'argent au-dessus d'une certaine température, soit à l'élimination de gaz occlus dans les lames (1) ; ces gaz, que la décharge n'a pas chassés quand la lame de mica protégeait la surface du verre, se dégageraient en déchirant la couche d'argent déposée.

J'ai donc essayé d'éliminer les gaz occlus sur les lames à argenter et d'empêcher l'élévation de la température. Aussitôt après avoir enlevé la lame de mica, je fais passer la décharge durant $1/4$ d'heure en prenant pour cathode le plateau d'aluminium ; de la sorte la surface des lames s'échauffe, libère les gaz occlus, mais ne s'argente pas.

Je rétablis alors la cathode sur la plaque d'argent et je procède à l'argenture, mais en faisant alterner 1 minute de repos et 1 minute de travail. J'ai obtenu ainsi en 2 heures de fonctionnement des argentures fortement réfléchissantes, uniformes et bleues par transmission.

B. *Mesure des pouvoirs réflecteurs.*

Le montage réalisé pour l'étude photométrique des anneaux par emploi d'un biréfringent se prête bien à la mesure des pouvoirs réflecteurs ; le principe de la méthode employée a été indiqué par Fabry pour des mesures visuelles (2).

Je diaphragme en hauteur la fente de sortie du monochromateur, de façon à avoir pour image sur la plaque un rectangle de 1×2 mm. En agissant sur les vis qui règlent l'orientation des lames de l'interféromètre, je leur donne un léger écart angulaire ; les réflexions successives provoquent alors sur la plaque l'apparition d'une série de plages juxtaposées ; il y a en réalité deux séries voisines de plages, puisque le biréfringent dédouble les images. Le flux lumineux est réparti sur toutes ces plages et les poses sont beaucoup plus longues que pour la photographie des anneaux ; afin de ne pas fatiguer les lampes de l'oscillateur, je prends comme

(1) Romanowa-Rubzow-Prokrowsky. *Phys. Zs. der Soviet Union*, 5 (1934), p. 746.

(2) Ch. Fabry. *Interférences lumineuses*, p. 42.

source une lampe à ruban de tungstène Philips qui, sous 17 ampères, donne une brillance de 200 bougies. Il suffit d'enlever le prisme Π_1 (fig. 10), et de placer le filament dans l'axe de L_2 de façon que son image se fasse sur l'objectif du spectrographe.

Il faut que les diverses plages aient reçu des faisceaux de même étendue ; la diaphragmation la plus forte se produit au voisinage du biréfringent ; c'est là que se forme l'image d'un diaphragme D qui est placé entre l'objectif et la fente, et dont l'ouverture est telle que les premiers faisceaux successifs passent entièrement à travers le biréfringent ; on le vérifie en observant directement les images de D sur la face de sortie du wollaston.

La densité de l'image photographique des plages est mesurée au microphotomètre visuel Fabry et Buisson : cet appareil permet d'opérer dans une très grande échelle de densités, depuis 0 jusqu'à 2,5 ou 3.

Si f est le pouvoir réflecteur des lames, les intensités d'une série de plages seront :

$$1, \quad f^2, \quad f^4, \quad f^6, \quad \text{etc.}$$

Soit θ l'angle qui définit l'orientation du polariseur par rapport au biréfringent ; les intensités de la deuxième série de plages seront :

$$\text{tg}^2\theta, \quad f^2\text{tg}^2\theta, \quad f^4\text{tg}^2\theta, \quad \text{etc.}$$

Je trace deux courbes I et II (fig. 26), en portant en ordonnées les numéros d'ordre des plages dans chaque série et en abscisses les densités mesurées ; ces deux courbes sont parallèles, aux erreurs d'expérience près. Supposons que la différence moyenne des ordonnées soit un nombre n ; si n est entier, cela signifie que la plage de rang $n + 1$ de la première série a la même densité que la plage de rang 1 de la deuxième série, autrement dit :

$$f^{2n} = \text{tg}^2\theta$$

ou

$$f^n = \text{tg}\theta.$$

La même équation subsiste évidemment pour n fractionnaire ; on mesure donc directement, non pas le pouvoir réflecteur, mais une puissance n de ce facteur ; l'erreur relative sur f est ainsi divisée par n . Pour chaque plaque la mesure fait intervenir un grand nombre de plages ; les erreurs accidentelles dues à l'hétérogénéité de l'émulsion sont ainsi atténuées ; enfin on utilise dans les pointés photométriques une plage de 1 mm² environ et des noircissements assez forts, ce qui diminue beaucoup l'influence du grain. Je n'ai donc pas jugé nécessaire dans ces mesures d'employer des plages de contrôle.

Les résultats sont d'autant plus précis que les lames sont plus réfléchissantes :

les courbes I et II comportent alors un plus grand nombre de points, et le nombre n mesuré est plus grand.

Voici quelques exemples de mesures ; chaque chiffre donné pour la densité est

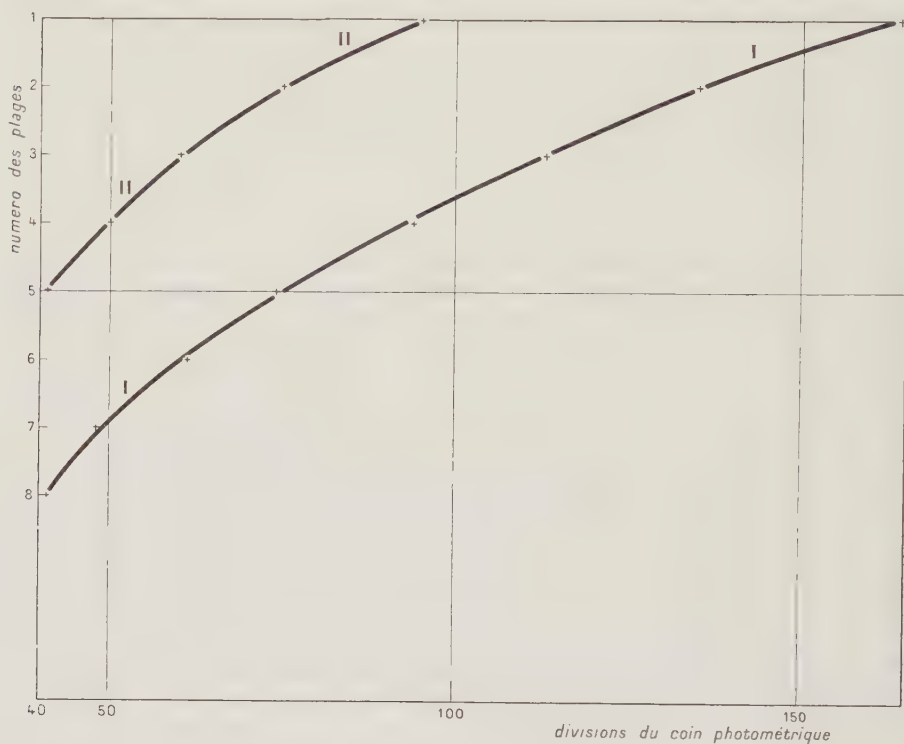


FIG. 26. — Mesure du pouvoir réflecteur des lames.

la moyenne de quatre pointés ; la densité est connue avec une erreur absolue de 0,01.

Plaque B. 249.

Durée de pose : 90 minutes, $\theta = 21^{\circ}0'$.

TABLEAU 7.

Nos de plages	1	2	3	4	5
Densités I	1,97	1,87	1,61	0,84	0,31
Densités II	1,80	1,31	0,55	0,30	...

Valeur moyenne $n = 1,42$ $f = 0,509_5$.

La même mesure a été recommencée plusieurs fois; le tableau 8 donne les résultats.

TABLEAU 8.

l'laque	Durée de pose	θ	n	f
B. 248	50 minutes	21°0'	1,43	0,512
B. 249	90 —	21°0'	1,42	0,509 _s
B. 251	90 —	25°0'	1,13	0,509

f moyen = $0,510 \pm 0,002$.

La valeur de f est connue à 1/2 % près.

Les mesures suivantes se rapportent à un pouvoir réflecteur élevé.

Plaque B. 197. Durée de pose : 2 heures ; $\theta = 29^{\circ} 44'$.

TABLEAU 9.

N ^{os} de plages	1	2	3	4	5	6	7	8
Densités I ..	1,64	1,35	1,13	0,94	0,74	0,61	0,48	0,41
Densités II ..	0,95	0,75	0,60	0,50	0,41	...	...	...

Valeur moyenne $n = 2,95$ $f = 0,827$.

Les courbes de la figure 26 correspondent au tableau 9.

Le tableau suivant donne les résultats de plusieurs mesures concernant les mêmes argentures.

TABLEAU 10.

Plaque	Durée de pose	θ	n	f
B. 197	120 minutes	29°44'	2,95	0,827
B. 198	165 —	24°32' 1 2	4,25	0,831 _s
B. 199	203 —	24°18'	4,35	0,833

f moyen = $0,830 \pm 0,003$.

3. L'interféromètre et le montage thermostatique.

Les interféromètres.

J'ai utilisé un étalon Perot et Fabry construit par Jobin et Yvon et un petit interféromètre de Hilger.

1° *L'étalon* comporte des lames de 40 mm de diamètre, diaphragmées à 22 mm, pour n'utiliser que la partie centrale. Les surfaces argentées sont maintenues à une distance fixe par des cales d'invar de 5 mm, 10 mm ou 15 mm. On peut également utiliser comme cales des sphères d'acier de roulement à billes. Les glaces sont appuyées contre les cales par des ressorts, dont des vis règlent la pression.

Le réglage est fait selon les méthodes classiques indiquées par M. Fabry (1) ; on le termine en constatant que le diamètre des anneaux d'interférence ne se modifie pas lorsque l'on déplace l'œil derrière les lames.

Il est commode, pour réaliser avec précision le parallélisme des lames, d'employer une source auxiliaire. J'utilise un arc à mercure ; un écran de gélatine colorée isole la raie verte ; un miroir à 45° peut être placé devant l'étalon et permet, durant le réglage, d'envoyer à travers les lames le faisceau provenant de la lampe à mercure ; pour la commodité de l'observation, une lentille de 20 cm, placée au voisinage de l'arc, forme sur l'œil une image de la source : les anneaux apparaissent alors dans un champ uniformément éclairé.

2° *L'interféromètre* est équipé avec des lames de 25 mm de diamètre ; l'une d'elles est fixe ; l'autre est portée par un chariot entraîné par une vis micrométrique ; la différence de marche maximum est 15 cm ; l'appareil est en acier.

Il est commode de régler les anneaux pour des lames rapprochées et d'écarter progressivement les glaces en corrigeant le réglage.

La lame fixe est portée par une tige de métal T dont l'autre extrémité est vissée sur le socle de l'appareil ; la partie libre de la tige a 7 cm de longueur environ ; deux ressorts tendus par des vis permettent de tordre légèrement la tige T ; on modifie ainsi légèrement l'orientation de la glace et on assure le réglage des anneaux.

Les argentures des deux lames se font face ; pour éviter les réflexions parasites sur les faces non argentées, on a donné à chaque glace une forme légèrement prismatique ; l'angle au sommet du prisme est de l'ordre de 10' ; le constructeur indique généralement, par un point gravé sur le côté des glaces, la position de l'arête du prisme. Dans le plan de la plaque photographique l'image principale est par suite bordée de deux images parasites très faibles, dont l'intensité est

(1) Ch. Fabry, *Interférences lumineuses*, p. 40.

de l'ordre de $1/100$ de l'intensité principale. Si elles sont nettement séparées de l'image principale, on peut les éliminer par un diaphragme placé contre la plaque. Si au contraire l'angle du prisme est trop petit, les images parasites sont à peine décalées par rapport à l'image principale. Il faut alors donner aux lames une orientation telle que les figures parasites coïncident le mieux possible avec la figure centrale. Moyennant ces précautions, ces images ne faussent en rien les mesures.

Etude du mouvement des franges en fonction de la température.

La pièce T de l'interféromètre était initialement une pièce de laiton ; le reste de l'appareil étant en acier, le montage était particulièrement sensible aux variations de température. La différence des coefficients de dilatation du laiton et de l'acier est 7×10^{-6} .

Supposons les deux lames rapprochées à quelques millimètres ; la dilatation différentielle porte sur toute la longueur de la tige T, soit 70 mm ; observons les anneaux de la raie du cadmium $\lambda = 6\,438 \text{ \AA}$.

Nous aurons un déplacement de 1 frange pour une élévation de température

$$dt = 0^{\circ},65.$$

J'ai étudié expérimentalement le mouvement thermique des franges ; pour cela je prends une fente de sortie très fine sur le monochromateur ; l'image sur la plaque aurait une largeur de $1/2 \text{ mm}$ environ ; je donne à la plaque, au moyen d'un mouvement d'horlogerie, une translation lente perpendiculaire à l'image de la fente.

Si les anneaux gardent le même rayon, on observe une série de traits parallèles correspondant aux maxima d'intensité ; si au contraire la température varie linéairement avec le temps, on voit sur la plaque un réseau de paraboles, qui ont pour axe la direction de déplacement et qui se déduisent les unes des autres par des translations parallèles à cet axe.

La figure 27 a (plaque n° B 184) montre une des plaques obtenues : la durée totale de l'expérience est de 2 heures ; au début, l'interféromètre a été échauffé par la présence de l'opérateur durant les réglages ; il se refroidit et les anneaux se resserrent. D'autre part le poste à haute fréquence apporte dans la salle une puissance de 1 kw et élève graduellement la température ; on observe alors une dilatation régulière du rayon des anneaux.

La deuxième photographie (fig. 27 b) (plaque n° B 183) correspond à une élévation continue de la température ; on y voit l'allure parabolique des franges.

Ce montage pourrait servir à l'étude de structures hyperfines : il suffirait d'analyser au microphotomètre le noircissement de la plaque sur l'axe des paraboles : on aurait une figure très étalée ; en ces points la dispersion angulaire est maxi-

mum et le pouvoir séparateur imposé par la diffraction ne modifie pratiquement pas le pouvoir de résolution de l'appareil. Il faudrait simplement disposer d'une source lumineuse de brillance constante et assurer une variation linéaire de la température en fonction du temps.

Dans mes expériences, j'ai cherché à diminuer l'action du facteur température ;

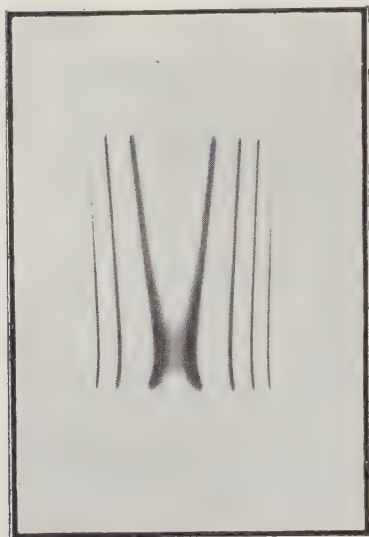


FIG. 27 a.

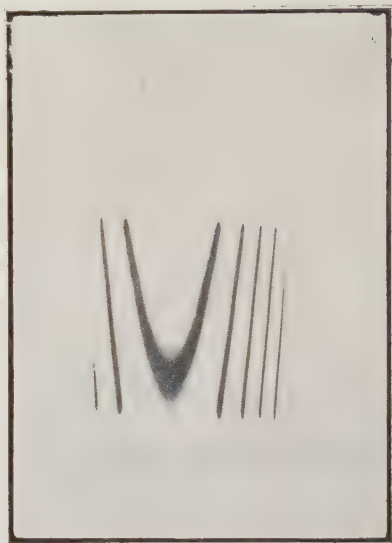


FIG. 27 b.

Dérivée thermique des franges.

Le petit côté de la figure est parallèle à l'image de la fente, le grand côté à la direction de translation de la plaque.

Le début de l'expérience correspond au bas de la figure.

la pièce T a été remplacée selon les cas par une pièce d'acier (aux faibles différences de marche) ou d'invar (aux grandes différences de marche). Avec un écart des lames de 5 mm et une pièce en acier, nous aurons un déplacement de 1/10 de frange pour une élévation de température

$$dt = 0^{\circ},64.$$

Si l'on assure la constance de la température à 1/50 de degré, le déplacement des anneaux sera de 0,003 interfrange ; donc négligeable.

Supposons cependant que les anneaux aient légèrement défilé pendant la pose, par exemple de 1,30 de frange ; la plaque enregistre leur position moyenne ; le déplacement a remplacé sur la courbe microphotométrique les ordonnées vraies par la valeur moyenne de l'intensité sur 1/60 de frange de part et d'autre de

l'abscisse étudiée ; la courbe ne diffère pas dans ses parties rectilignes de celle que donnerait un système immobile d'anneaux ; elle en diffère d'une quantité négligeable dans les parties où la courbure est maximum.

Dans mes expériences, l'élévation de température de la salle est de $1/2$ degré par heure, il n'y a pas de précautions spéciales à prendre pour des poses inférieures à 2 ou 3 minutes ; pour des poses plus longues, il faut assurer par une régulation la constance de la température autour de l'interféromètre.

Protection thermique de l'interféromètre.

Tout le système optique compris après la fente de sortie du monochromateur se trouve à l'intérieur d'une grande cage en contreplaqué, qui constitue une chambre noire ; la face antérieure est percée d'une petite ouverture, où passe le tube qui porte la fente de sortie du monochromateur ; les grandes faces latérales sont fermées par deux volets, qui coulisent le long de glissières verticales ; ces volets sont équilibrés par des contrepoids et se déplacent sans heurt ; leur manœuvre ne dérègle pas les lames de l'interféromètre. La face arrière de la cage est percée d'une ouverture carrée de 30 cm de côté, fermée par un volet mobile ; cette ouverture permet à l'opérateur d'observer le faisceau ou l'image des anneaux et de manœuvrer le chariot porte-plaque ; on peut, s'il est nécessaire, faire l'obscurité durant ces opérations en fermant deux rideaux opaques qui constituent une chambre noire derrière la cage interférométrique.

La cage est noircie intérieurement, pour éviter la diffusion possible de la lumière ; elle est extérieurement calorifugée par une couche uniforme de feutre de 1 cm d'épaisseur.

Appareil régulateur de température.

À l'intérieur de la cage interférométrique et au voisinage de l'interféromètre se trouve un thermorégulateur à mercure « Quickset » de l'American Instrument Co. Cet appareil est tout simplement un thermomètre à gros réservoir, avec deux passages de fil dans la partie capillaire ; quand le mercure monte dans la tige, il met en communication les deux électrodes ; on peut régler l'appareil pour que le contact se produise à une température donnée. Le thermorégulateur permet de manœuvrer une puissance de 0,08 watt. Le contact est défini à $0,01$ degré près ; le mercure reste propre, car il est constamment en présence d'une atmosphère d'hydrogène qui remplit la partie supérieure du tube. L'appareil est scellé.

Ce thermorégulateur manœuvre par un système de relais le courant d'un rhéostat R placé dans la cage interférométrique. Le schéma 28 *a* indique la disposition des appareils ; tous les éléments du montage sauf le thermorégulateur et la résistance R sont extérieurs à la cage.

La grille d'une triode est polarisée à — 20 volts par une batterie d'ac-

cumulateurs. Quand le contact T est établi, le potentiel de grille passe à -1 ou -2 volts. Le courant de plaque passe alors de 0 à 10 milliampères. De la sorte le thermorégulateur manœuvre un circuit où la puissance est pratiquement nulle. Le courant de plaque actionne, par un double relais AB, un interrupteur à mercure de la Société de Recherches et Perfectionnements Industriels I_3 . Quand le contact T est coupé, le contact I_3 est établi ; la résistance R_1 est court-circuitée ; une batterie de 120 volts envoie dans le rhéostat R un courant que règle la résistance R_2 ; la température de la cage s'élève. Le contact T s'établit alors et coupe I_3 ; à ce moment la résistance R_1 s'intercale dans le circuit et diminue le courant qui traverse R.

Le thermorégulateur est réglé pour une température qui dépasse de 4 ou 5 degrés

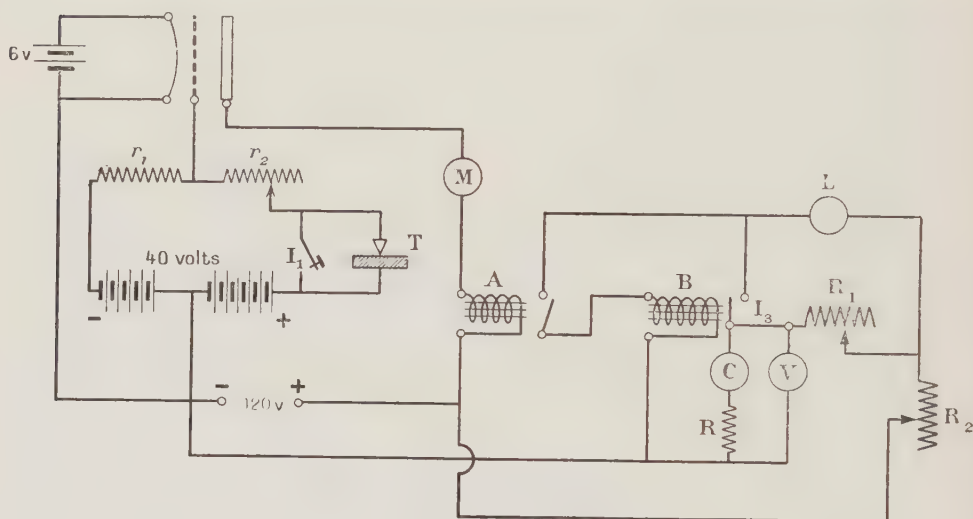


FIG. 28 a. — Relais du thermostat (1).

$r_1 = 50\,000\ \Omega$, $r_2 = 100\,000\ \Omega$ à plots. $R_1 = 100\ \Omega$, $R_2 = 400\ \Omega$, $R = 80\ \Omega$, chauffage de la cage.

T, thermorégulateur. A, B, relais. L, lampe 4 V.

C, ampèremètre 2 A. V, voltmètre 120 V. M, milliampèremètre 10 mA.

la température de la salle ; on règle R_2 et R_1 de façon que la cage s'échauffe ou se refroidisse selon les mouvements de l'interrupteur I_3 . Il faut obtenir des périodes égales de chauffage et de refroidissement ; les oscillations de la température dans la cage seront d'autant plus faibles que les puissances mises en jeu par le chauffage et le refroidissement seront plus rapprochées.

L'interrupteur I_1 qui shunte le thermostat permet à tout instant de vérifier le

(1) Correction au schéma : la borne supérieure de l'interrupteur commandé par A est reliée directement au pôle positif de la batterie de 120 v et non à L.

fonctionnement des relais ; la lampe L est une petite lampe témoin de 4 watts, qui renseigne l'opérateur sur l'état du contact T.

Appareils de chauffage et uniformisation de la température (fig. 28 b).

Le rhéostat R est suspendu au centre de la cage ; il est constitué par du fil nichrome nu enroulé sur un cadre horizontal de 15 cm de côté ; au-dessous de R se trouve un ventilateur à hélice horizontale qui crée un violent courant d'air ; l'air chaud vient s'étaler sur le toit de la cage et redescend le long des parois. Le moteur du ventilateur consomme un courant de 1,5 ampères sous 40 volts.

Il est nécessaire de soustraire l'interféromètre aux vibrations du moteur ; pour cela, le ventilateur est encastré dans un plateau de bois par l'intermédiaire de caoutchouc mousse ; le plateau est suspendu au toit de la cage par des tiges de

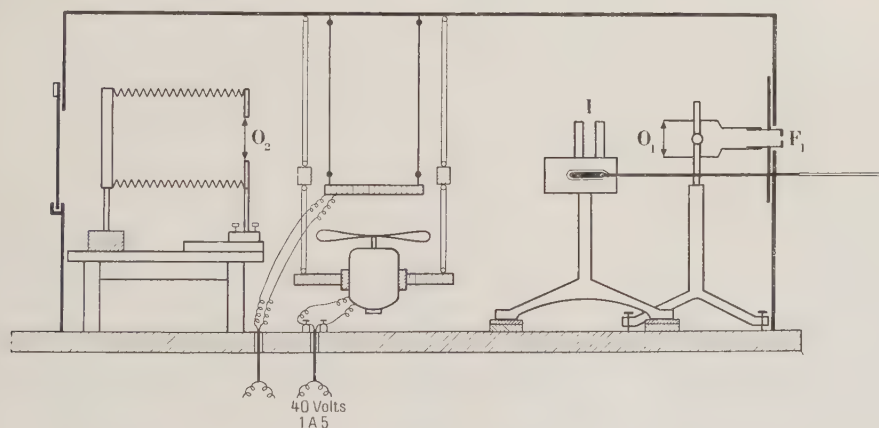


FIG. 28 b. — Disposition des appareils dans la cage interférométrique.

caoutchouc portant en leur centre des masses de plomb de 500 g qui arrêtent les vibrations.

L'interféromètre lui-même repose sur la table par l'intermédiaire de trois cales de caoutchouc.

Un thermomètre gradué en cinquantièmes de degré traverse la face avant de la cage et indique la température de l'air au voisinage de l'interféromètre ; c'est un thermomètre à renversement, que l'on peut régler pour une température donnée ; un deuxième thermomètre donne à 1/10 de degré la température rapportée au zéro centigrade.

Enfin pour accélérer, au début de l'expérience, le chauffage de l'enceinte, on peut envoyer un courant de 4 ampères dans un rhéostat de 30 ohms à fil nu, simplement posé sur la table, au voisinage du ventilateur.

Etude de l'échauffement et du refroidissement de la cage.

La courbe de la figure 29 représente les variations de température de la cage en l'absence de régulation. Soit W la puissance constante apportée à l'appareil, T la température de la cage, T_0 la température de la salle ; les pertes de chaleur sont en

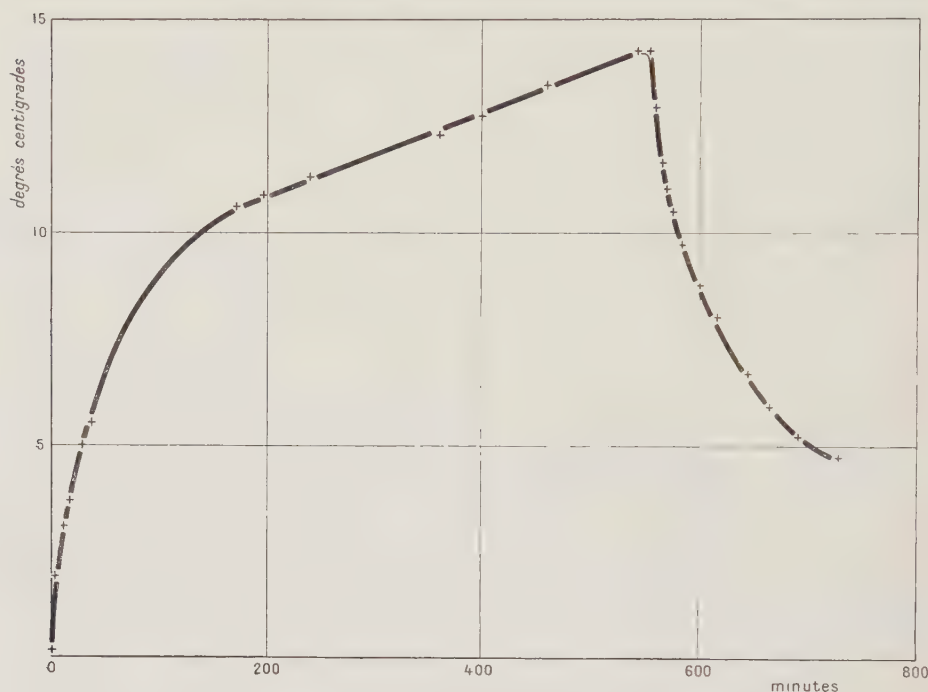


FIG. 29 — Echauffement et refroidissement de la cage calorifique.

première approximation $K (T - T_0)$. K est une constante caractéristique de l'enceinte ; l'élévation de température sera donnée en fonction du temps t par l'expression :

$$T - T_0 = \frac{W}{J K} \left(1 - e^{-\frac{Kt}{MC}} \right).$$

MC désigne l'équivalent en eau de l'ensemble des appareils. Le coefficient angulaire de la tangente à l'origine est :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W}{J M C}.$$

J'ai construit la courbe représentant l'élévation de température en fonction du temps pour $W = 150$ watts.

La tangente à l'origine a un coefficient angulaire correspondant à une élévation de température de $0^{\circ},39$ par minute.

$MC \approx 5,5$ grandes calories.

Si T_1 est la température limite, le nombre K est donné par

$$K = \frac{W}{J(T_1 - T_0)}.$$

La courbe 29 indique les résultats des mesures; on voit qu'il y a d'abord croissance de la température selon la loi exponentielle indiquée; mais, au lieu d'atteindre un palier, les ordonnées continuent à croître lentement suivant une loi linéaire; le coefficient K n'est pas constant; le calorifuge s'améliore lentement au cours du fonctionnement. Ce phénomène n'est pas gênant dans les mesures; il suffit de modifier de temps en temps le réglage des rhéostats R_1 et R_2 .

La valeur de K est de l'ordre de 3, 5 calories par seconde et par degré.

La mise en route du thermostat exige environ 30 minutes. Voici pour une expérience quelques données numériques:

$$T = 26^{\circ}$$

$$T_0 = 19^{\circ}$$

Puissance de chauffage = 106 watts.

Puissance de refroidissement = 97 watts.

Durée de chaque phase = 1 minute.

Oscillations du thermomètre = $0,02$ degré entre les valeurs extrêmes.

L'inertie thermique de l'interféromètre augmente encore la précision avec laquelle la constance de sa température est assurée.

TROISIEME PARTIE

RÉSULTATS DES MESURES

I. — RAYONS DES ANNEAUX

Le carré du rayon des anneaux successifs, correspondant aux points où l'intensité lumineuse est maximum ou minimum, varie comme la suite des nombres entiers. Cette loi est vérifiée avec une bonne approximation dans toutes les mesures.

L'intérêt principal de cette vérification est de prouver que les lames sont bien planes et bien parallèles.

L'indique à titre d'exemple les rayons des maxima donnés par un étalon pour une différence de marche de 30 mm. Le pouvoir réflecteur est assez faible :

$$f = 0,51.$$

Il en résulte une certaine imprécision dans la détermination d'un maximum, on voit néanmoins que la vérification est satisfaisante.

Les indices d et g se rapportent aux portions des anneaux situés à droite et à gauche du centre; les rayons sont mesurés en millimètres lus sur un enregistrement à amplification 14.

TABLEAU 11.

N ^o des anneaux	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r_d	63	80,5	95	107	118	128	135,5	146	154,5	162,5
r_g	63	80,5	94,5	107	118	128	137	»	»	»
r_d^2	3 970	6 480	9 025	11 450	13 925	16 380	18 910	21 320	23 870	26 406
r_g^2	3 970	6 480	8 930	11 450	13 925	16 380	18 770	»	»	»
r^2	3 970	6 460	8 945	11 435	13 920	16 410	18 900	21 385	23 875	26 360

La dernière ligne correspond aux chiffres calculés par la loi linéaire empirique :

$$r^2 = 3\,970 + 2\,488\,p \quad (p \text{ entier}).$$

La courbe 30 montre comment les points s'alignent sur une droite ; le point d'intersection de la droite avec l'axe des ordonnées, ou encore la formule précédente, donnent l'excédent fractionnaire au centre.

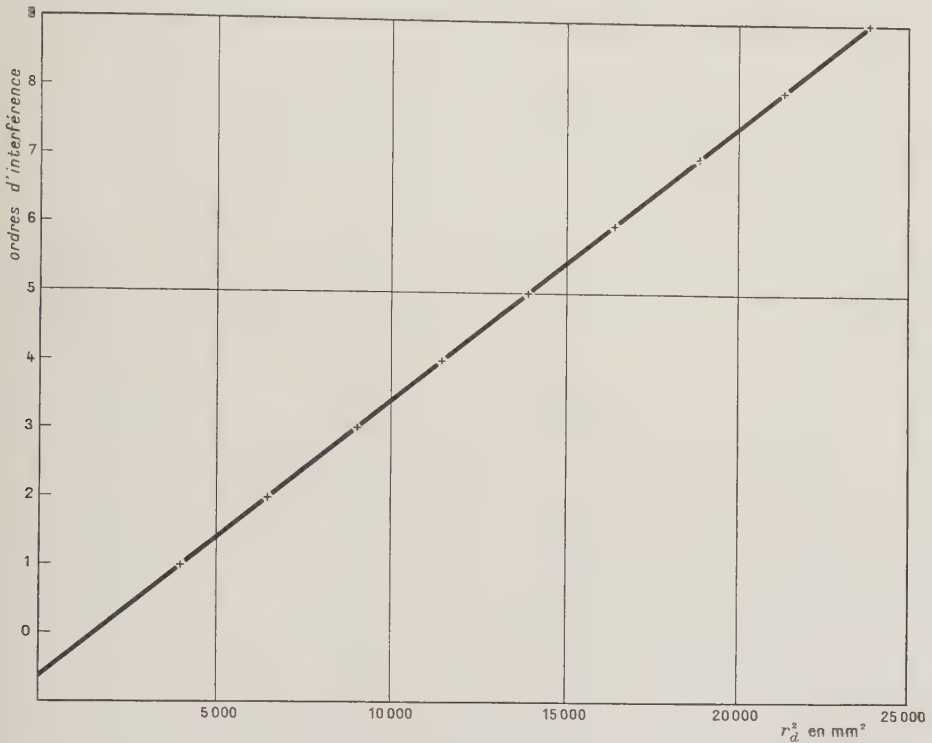


FIG. 30. — Rayons des anneaux.

II. — ANNEAUX A FAIBLE DIFFÉRENCE DE MARCHE

J'ai examiné si pour de faibles différences de marche, où la raie peut être considérée comme monochromatique, la distribution de l'intensité lumineuse dans la figure d'interférences correspond bien aux formules théoriques.

J'ai employé des argentures faibles, pour avoir des anneaux plus larges, et par suite une définition meilleure des abscisses. Les abscisses sont déterminées à 0,2 mm près sur un enregistrement à l'amplification 14. Toutes les expériences se rapportent à la raie rouge du cadmium.

Dans toutes les mesures, le contraste des anneaux a été plus faible que le contraste calculé à partir du pouvoir réflecteur ; le désaccord est d'autant moins grand et la courbe est d'autant plus voisine de la courbe théorique que la diffé-

rence de marche est plus petite ; on peut prévoir à la limite une vérification rigoureuse des formules pour une différence de marche nulle ; je reviendrai sur ces questions au chapitre suivant.

J'indique d'abord les résultats des mesures pour de faibles différences de marche.

Mesures directes par le biréfringent.

Appareil : interféromètre Hilger.

Plaque n° 80. Pouvoir réflecteur des lames : 0,396₅. Distance des lames : 2,48 mm. Amplification du microphotogramme : 50. $\theta = 38^{\circ} 56'$.

Les rayons des anneaux sont évalués en millimètres sur le microphotogramme.

Les 2^e et 4^e colonnes du tableau 12 indiquent les valeurs mesurées pour l'intensité lumineuse, quand on prend pour unité l'intensité maximum.

TABEAU 12.

r^2	I	r^2	I
144 800	0,206	348 700	0,206
162 400	0,22	338 700	0,21
177 200	0,255	319 300	0,25
188 400	0,31	306 900	0,295
198 500	0,365	296 500	0,36
209 800	0,465	285 700	0,46
223 700	0,695	270 900	0,69
229 400	0,805	265 700	0,80
248 000	1,00	248 000	1,00

D'après le pouvoir réflecteur mesuré, l'intensité du minimum doit être

$$i_m = 0,187 \quad \text{pour } f = 0,396_5.$$

Les mesures donnent

$$i_m = 0,206 \quad \text{ce qui correspond à } f = 0,375.$$

L'écart entre i_m calculé et i_m mesuré est 0,02, soit 2 fois la limite indiquée pour l'erreur possible sur les intensités ; néanmoins il ne doit pas être attribué à une erreur accidentelle dans les mesures, car on a systématiquement, et pour tous les clichés, des écarts de même sens.

La courbe expérimentale est très voisine de la courbe I calculée à partir de $f = 0,396_5$; elle est identique à la courbe II ⁽¹⁾ calculée en prenant $f = 0,375$.

Soit Δr^2 la différence entre le carré de l'abscisse courante et le carré de l'abs-

(1) Koch. *Ann. der Phys.*, 42 (1913), p. 17, a dans des mesures analogues constaté l'identité de la courbe expérimentale et d'une courbe théorique déduite d'un pouvoir réflecteur arbitrairement choisi ; malheureusement l'auteur n'a pas mesuré directement le pouvoir réflecteur de ses lames.

cisse du maximum; les deux courbes théoriques ont respectivement pour équation :

$$I_1 = \frac{1}{1 + 4,35 \sin^2 \left(\frac{\Delta r^2}{1\,133} \right)}, \quad I_2 = \frac{1}{1 + 3,85 \sin^2 \left(\frac{\Delta r^2}{1\,133} \right)}.$$

Le tableau 13 donne le résultat du calcul, pour des points où les différences de phase sont des multiples de 10° ; les intensités ont été déterminées avec la précision de la règle à calcul. L'abscisse adoptée pour le maximum correspond à l'axe de symétrie de la courbe expérimentale, soit $r^2 = 247\,000$.

TABLEAU 13.

r^2		Courbe I	Courbe II
145 030	348 970	0,187	0,206
156 360	337 640	0,191	0,210
167 690	326 310	0,207	0,227
179 020	314 980	0,235	0,255
190 350	303 650	0,280	0,305
201 680	292 320	0,357	0,385
213 010	280 990	0,478	0,510
224 340	269 660	0,675	0,690
235 670	258 330	0,885	0,895
247 000	247 000	1	1

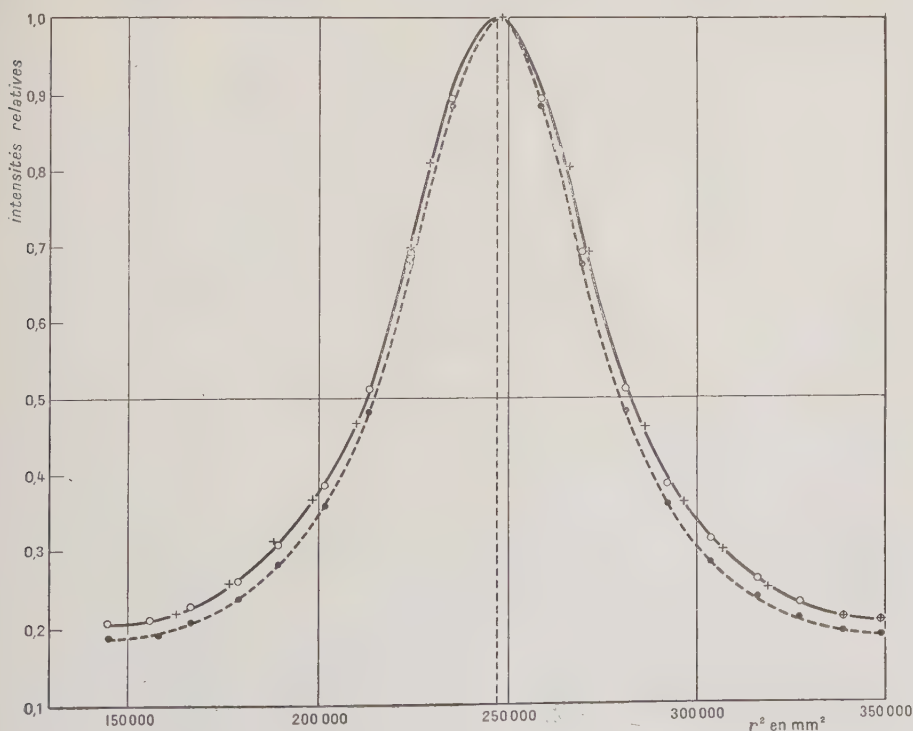


FIG. 31. — × points mesurés. ● courbe I ○ courbe II.

Les largeurs des anneaux, mesurées en interfranges, sont, pour les trois courbes, respectivement :

$$\Delta = 0,338 \quad \Delta_1 = 0,318 \quad \Delta_2 = 0,341.$$

La courbe 31 représente les résultats donnés dans les tableaux 12 et 13.

Étalonnage par des écrans auxiliaires.

Plaque n° B 304.

Appareil : étalon fixe.

Distance des lames : 3 mm, 12.

Pouvoir réflecteur : 0,51.

Ecran d'étalonnage n° B 236.

Amplification du microphotogramme : 14.

r en millimètres sur le microphotogramme.

TABEAU 14.

r^2	r^2	I
11 340	11 340	1
11 775	10 840	0,912
11 990	10 550	0,813
12 140	10 450	0,750
12 320	10 260	0,671
12 480	10 100	0,598
12 660	9 920	0,537
12 840	9 760	0,479
12 980	9 620	0,427
13 190	9 470	0,385
13 340	9 220	0,343
13 570	9 040	0,302

La largeur de l'anneau est en interfranges :

$$\Delta = 0,246.$$

D'après le pouvoir réflecteur, on devrait obtenir :

$$\Delta = 0,222 \quad f = 0,51.$$

La valeur trouvée expérimentalement correspond à $f = 0,48$. J'ai tracé les courbes théoriques I et II pour $f = 0,51$ et $f = 0,48$.

$$I_1 = \frac{1}{1 + 8,5 \sin^2 \frac{\Delta r^2}{662}} \quad I_2 = \frac{1}{1 + 7,05 \sin^2 \frac{\Delta r^2}{662}}.$$

Δr^2 désigne la différence entre les carrés de l'abscisse courante et de l'abscisse d'un maximum.

Les points calculés correspondent encore à des différences de phase multiples de 10° .

TABLEAU 15.

r^2	r^2	I_1	I_2
11 300	11 300	1	1
10 640	11 960	0,795	0,825
9 980	12 620	0,501	0,547
9 310	13 290	0,320	0,362
8 650	13 950	0,222	0,255

La figure 32 représente les résultats.

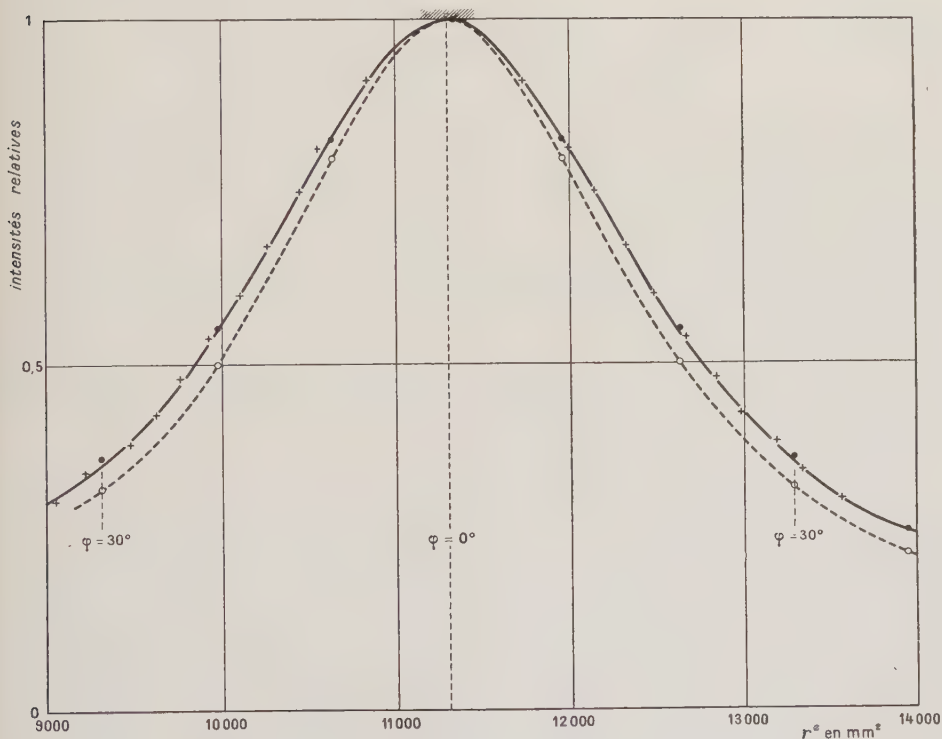


FIG. 32. — $\times$ points mesurés. $\circ$ courbe I. $\bullet$ courbe II.

On voit encore que la courbe II coïncide avec la courbe expérimentale.

Sur l'enregistrement figurent encore deux autres anneaux, l'un symétrique de celui que nous avons étudié, l'autre correspondant à un rayon plus grand; leurs

largeurs sont $\Delta = 0,238$ et $\Delta = 0,246$, en bon accord avec la valeur précédente $\Delta = 0,246$.

Etude du pied des anneaux.

La distribution de l'intensité lumineuse est de la forme :

$$J(\theta) = \frac{1}{1 + a \sin^2 \theta} \quad , \quad \theta = \frac{\gamma}{2} - \pi h \quad , \quad a = \frac{4f}{(1-f)^2}$$

quand l'unité d'intensité est l'intensité d'un maximum. Prenons au contraire pour unité l'intensité d'un minimum :

$$J(\theta) = \frac{1+a}{1+a \sin^2 \theta} \quad .$$

Quand on prend des lames de plus en plus réfléchissantes, cette fonction tend vers :

$$J(\theta) = \frac{1}{\sin^2 \theta} \quad \text{indépendant de } a.$$

On voit :

- 1° que l'éclairement varie rapidement, même au voisinage d'un minimum ;
- 2° que la variation de $J(\theta)$ dépend peu du pouvoir réflecteur dans les parties sombres des anneaux.

Je vais indiquer les résultats de mesures faites dans ces conditions, par la méthode des écrans auxiliaires.

Plaque n° B 258. Durée de pose : 20 secondes. Ecran d'étalonnage B 236.

Appareil : étalon fixe. Distance des lames : 3 mm,97. $f = 0,51$.

Amplification du microphotogramme : 14.

r en millimètres sur l'enregistrement.

TABLEAU 16.

r^2 mesuré		I mesuré courbe I	θ (degrés)	r^2 calculé		$\sin^2 \theta$ courbe II	I calculé, $f = 0,51$ courbe III
	8 575	3,13	30	2 177	8 573	4	3 05
"	8 335	2,53	35	2 443	8 307	3,04	2,50
"	8 045	2,14	40	2 710	8 040	2,41	2,10
2 970	7 800	1,87	50	3 243	7 507	1,69 ₅	1,58
3 180	7 570	1,66	60	3 776	6 974	1,33 ₅	1,29
3 375	7 345	1,50	70	4 309	6 441	1,14	1,12
3 660	7 105	1,36 ₅	80	4 842	5 908	1,03	1,03
3 970	6 770	1,23	90	5 375		1	1
4 355	6 400	1,11					
5 230		1					

RÉSULTATS DES MESURES

Les trois courbes ont pour axe de symétrie la verticale d'abscisse 5 375.

On voit sur les courbes (fig. 33) que le tracé II constitue bien une limite supérieure du tracé expérimental I. Les points calculés III coïncident pratiquement avec les points expérimentaux ; on n'a pas besoin ici de modifier la valeur mesurée pour f . Ceci est dû au fait que le tracé de la courbe dépend peu du pouvoir réflec-

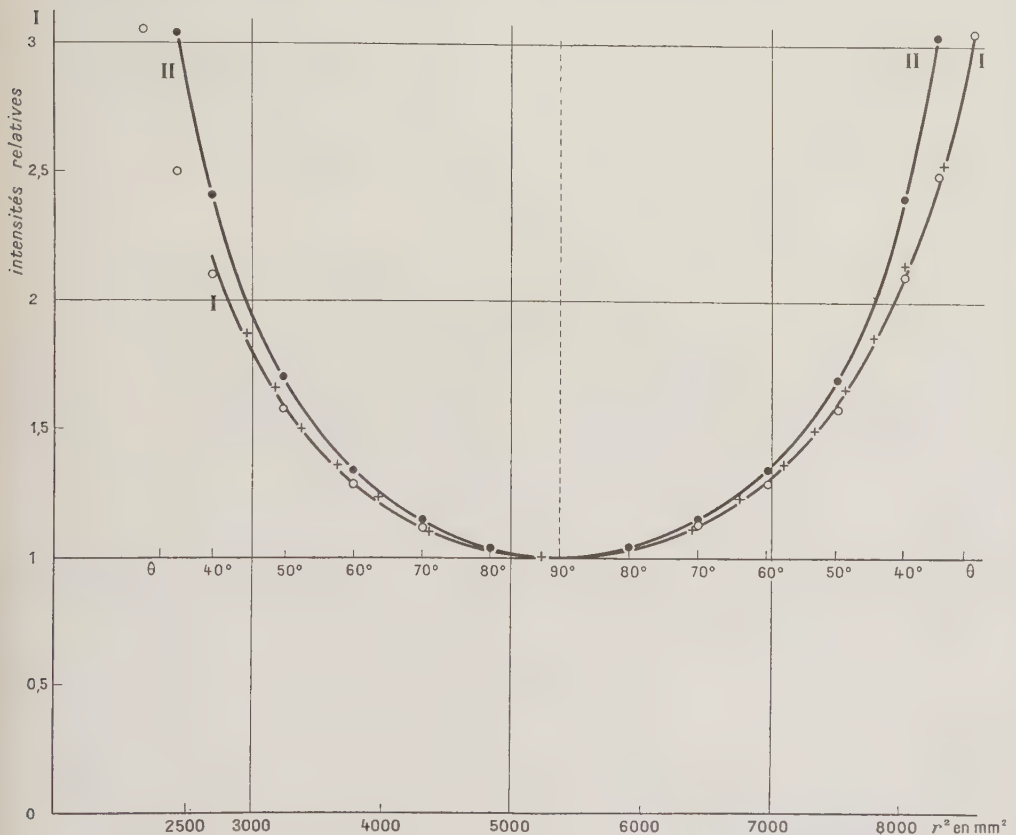


FIG. 33. — Etude du pied des anneaux. × courbe expérimentale I.
• courbe limite II. ○ courbe calculée III.

teur ; la concordance entre I et III prouve cependant la précision des mesures d'intensité.

Bien que l'écart des deux courbes soit dans la limite des erreurs d'expérience, il semble que les points III soient au-dessous des points I.

Nous reviendrons sur ces divers résultats dans la suite de ce travail.

Théorie de Burger et van Cittert.

En résumé, dans les expériences précédentes, il y a accord entre les mesures et les formules théoriques, à la condition de remplacer le pouvoir réflecteur réel par un pouvoir réflecteur efficace, légèrement plus petit.

Burger et van Cittert (1) ont signalé le même résultat : leur source était un tube à cadmium à électrodes extérieures, excité par du courant de 500 périodes; les auteurs mesuraient la demi-largeur des anneaux.

Pour des distances de 5 mm, 10 mm et 15 mm entre les lames, les résultats sont les suivants :

$$f_{\text{réel}} = 0,80, \quad f_{\text{efficace}} = 0,76.$$

Les auteurs supposent f_{efficace} constant et éliminent la largeur de la raie entre les équations données par les mesures.

Pour expliquer le désaccord, Burger et van Cittert admettent que les lames ne sont pas parfaitement planes, mais que de petits écarts par rapport au plan idéal provoquent pour un domaine dS de la lame une variation de phase $\delta\gamma$.

L'intensité est alors, en désignant par S la surface utile des lames :

$$J(\gamma) = \frac{1}{S} \int \frac{1}{1 + a(\gamma + \delta\gamma)^2} dS.$$

$\delta\gamma$ étant petit, on peut employer un développement en série. Les écarts étant de sens quelconque, on a : valeur moyenne de $\delta\gamma = 0$. Posons de plus : valeur moyenne de $(\delta\gamma)^2 = m^2$. On a :

$$J(\gamma) = \frac{1}{1 + a\gamma^2} + \frac{a(3a\gamma^2 - 1)}{(1 + a\gamma^2)^3} m^2.$$

$J(\gamma)$ est encore maximum pour $\gamma = 0$.

$$J(\gamma)_{\text{max}} = 1 - m^2 a.$$

La valeur γ' pour laquelle cette intensité est divisée par 2 est :

$$\gamma' = \frac{1}{a} + 3m^2.$$

Soit j la largeur des anneaux pour des lames idéalement planes, et pour une raie monochromatique ; j' la largeur pour des lames présentant des défauts, Δ^2 le carré moyen des écarts sur la distance des lames. L'équation précédente peut s'écrire :

$$(25) \quad j_{\text{A}}'^2 = j_{\text{A}}^2 + 12 \frac{\Delta^2 \lambda^2}{d^2} ;$$

(1) Burger et van Cittert. *Zs. für Physik*, 44 (1927), p. 66.

ou, en mesurant j en interfranges :

$$j'^2 = j^2 + 48 \frac{\Delta^2}{\lambda^2}.$$

D'après les chiffres indiqués par les auteurs, Δ serait de l'ordre de quelques millimicrons.

Burger et van Cittert ont observé, en dehors de défauts répartis accidentellement sur les surfaces, une courbure générale des lames, qui brouille les anneaux quand on augmente le rayon d'ouverture ρ du diaphragme placé devant l'interféromètre.

L'écart entre j'^2 et j^2 varie proportionnellement à ρ^4 .

Pour $\rho = 0,5$ cm la courbure des lames utilisées par les auteurs n'intervient pas.

Pour $\rho = 2$ cm les anneaux s'élargissent.

Dans mes expériences, les valeurs de ρ sont :

$\rho = 2$ mm, 5 quand la lumière est graduée par le biréfringent ;

$\rho = 6$ mm quand la lumière est graduée par des écrans auxiliaires.

J'ai vérifié que la largeur des anneaux est dans ces conditions indépendante de ρ . La courbure générale des lames de mon interféromètre est donc négligeable et n'intervient pas dans les mesures.

Il se pourrait que des défauts répartis au hasard sur les surfaces expliquent la diminution apparente du pouvoir réflecteur, aux faibles différences de marche ; mais les expériences que je vais décrire semblent prouver que, même pour des lames rapprochées de quelques millimètres, les anneaux sont déformés par l'influence du pied de la raie étudiée ; rien ne s'oppose à ce que, pour une différence de marche nulle, on atteigne la largeur théorique.

Si l'effet prévu par la théorie de Burger et van Cittert existe pour les surfaces que j'ai employées, il est certainement plus petit que l'influence du pied de la raie.

Il serait intéressant, en utilisant la même source et le même appareil que les auteurs, de mesurer les largeurs et les pouvoirs réflecteurs pour diverses longueurs d'onde ; on doit trouver, si la théorie s'applique, la même valeur pour la grandeur géométrique Δ .

III. — VARIATION DE LA LARGEUR DES ANNEAUX AVEC L'ÉCARTEMENT DES LAMES

Observations visuelles sur la raie rouge du cadmium.

1^o Si l'on écarte les lames de l'interféromètre, on constate que les anneaux disparaissent pour un écartement D entre les lames :

$$D = 72 \text{ mm} \qquad \lambda = 6\,438 \text{ Å.}$$

Si la raie est une raie monochromatique, simplement élargie par effet Doppler-Fizeau elle a pour largeur $d\lambda$:

$$d\lambda = \frac{\lambda^2}{2D} = 0,028 \text{ \AA}.$$

2° En réalité, il n'en est pas ainsi ; dans les tubes à haute fréquence se produit le phénomène de renversement signalé pour d'autres sources par M. Pérard (1) ; les anneaux, brouillés pour $D = 72$ mm, reparaissent faiblement pour des différences de marche plus grandes ; il y a renversement *partiel* de la raie. Si la raie est assimilable à un doublet, les anneaux disparaissent quand les systèmes donnés par les deux composantes sont exactement intercalés ; l'écart entre les composantes, correspondant à une disparition d'anneaux pour $D = 72$ mm, est alors :

$$d\lambda = 0,014 \text{ \AA} \text{ (2)}.$$

3° La raie est élargie vraisemblablement par absorption ; l'effet Doppler-Fizeau seul donnerait une raie beaucoup plus fine.

Je n'ai pas mesuré directement la température des tubes, mais elle est certainement inférieure à 400° C, température pour laquelle la tension de sublimation du cadmium est de 1 mm de mercure ; pour des pressions plus fortes, la vapeur s'illuminerait mal. A 400° l'effet Doppler-Fizeau impose à la raie une largeur $d\lambda = 0,012 \text{ \AA}$ et une valeur limite de l'écartement des lames : $D = 16,4$ cm.

En résumé, les observations visuelles montrent que la raie émise en haute fréquence est perturbée ; il y a élargissement par absorption ou toute autre cause se superposant à l'effet Doppler-Fizeau, et renversement partiel de la raie.

Si l'on représente, dans l'échelle des nombres d'ondes, la répartition de l'intensité lumineuse de la raie, on a, non la courbe en cloche qui correspond à l'effet Doppler-Fizeau, mais une courbe déformée, où la partie centrale présente un léger minimum entre deux maxima ; il en résulte que l'intensité des ailes de la raie devient notable, par rapport à l'intensité maximum.

L'influence du pied de la raie sur la distribution lumineuse dans les anneaux sera encore accrue si les pouvoirs réflecteurs sont faibles ; une raie monochromatique donnerait alors des anneaux ayant, dans l'échelle des longueurs d'onde, une largeur $\Delta\lambda$; réciproquement, un point de la figure d'interférences reçoit des radiations correspondant à un domaine spectral de l'ordre de $\Delta\lambda$.

Si les argentures sont fortes, $\Delta\lambda$ est petit, l'intensité moyenne pour un domaine spectral de largeur $\Delta\lambda$ est grande au voisinage du maximum de la raie, faible sur les ailes. Si l'argenture est légère, $\Delta\lambda$ est au contraire grand, la valeur moyenne

(1) Pérard, C. R., 198 (1934), p. 727.

(2) Ce nombre est du même ordre de grandeur que celui indiqué par M. Pérard, pour sa lampe à capillaire aplati ; $d\lambda$ en ce cas est légèrement supérieur à 0,01 Å.

de l'intensité devient plus faible au voisinage du maximum, et l'influence des ailes est plus importante.

Je me suis efforcé, dans mes mesures, de maintenir constant le fonctionnement de la source : en particulier, j'ai toujours utilisé les mêmes tensions d'alimentation, et la même position géométrique du tube à gaz raréfié au centre des spires du circuit oscillant ; dans ces conditions, il est facile d'obtenir pour un tube à gaz des conditions d'illumination constantes ; les résultats sont moins satisfaisants quand il s'agit d'une *vapeur* comme le cadmium : le fonctionnement de la source dépend alors de la distribution du métal solide dans le tube et des écarts possibles de température entre les divers points de l'ampoule ; il en résulte une variation dans l'élargissement de la raie et une dispersion des mesures qui se superposent aux erreurs photométriques.

Variation de la largeur des anneaux avec l'écartement des lames.

A. Mesures avec le biréfringent.

Les mesures indiquent, aux faibles différences de marche, une variation rapide de la largeur avec la distance D des lames. On peut, pour chaque expérience, représenter la forme des anneaux par une formule où figure un pouvoir réflecteur efficace, calculé d'après le contraste $\frac{I_{\text{maximum}}}{I_{\text{minimum}}}$ des anneaux, mais la valeur ainsi obtenue n'est pas constante et décroît quand D augmente ; d'autre part, on observe déjà pour $D = 4$ mm une légère divergence entre les intensités mesurées et les intensités calculées à partir du pouvoir réflecteur efficace.

Le tableau 16 résume les résultats.

TABLEAU 16.

N° de plaque	Distance des lames	Largeur en interfranges	f efficace	I minimum
Calculé	°	0,318	0,396 ₅	0,187
B 80	2,48 mm	0,338	0,375	0,205
B 78	3,50	0,362	0,362	0,219
B 82	4,55	0,389	0,342	0,240

La courbe 34 représente les résultats.

Les distances D ont été évaluées à partir du rayon des anneaux.

Pour $D = 4,55$ mm les points calculés sont légèrement *au-dessous* des points expérimentaux, sauf bien entendu pour le maximum et le minimum, qui, par construction, coïncident avec les points mesurés.

Ceci confirme le résultat obtenu dans l'étude du pied des anneaux ; quand on prend pour unité l'intensité d'un minimum, les valeurs théoriques sont légèrement inférieures aux valeurs expérimentales, au voisinage de ce minimum.

Dans ces mesures, le diaphragme placé devant le polariseur ne couvrait

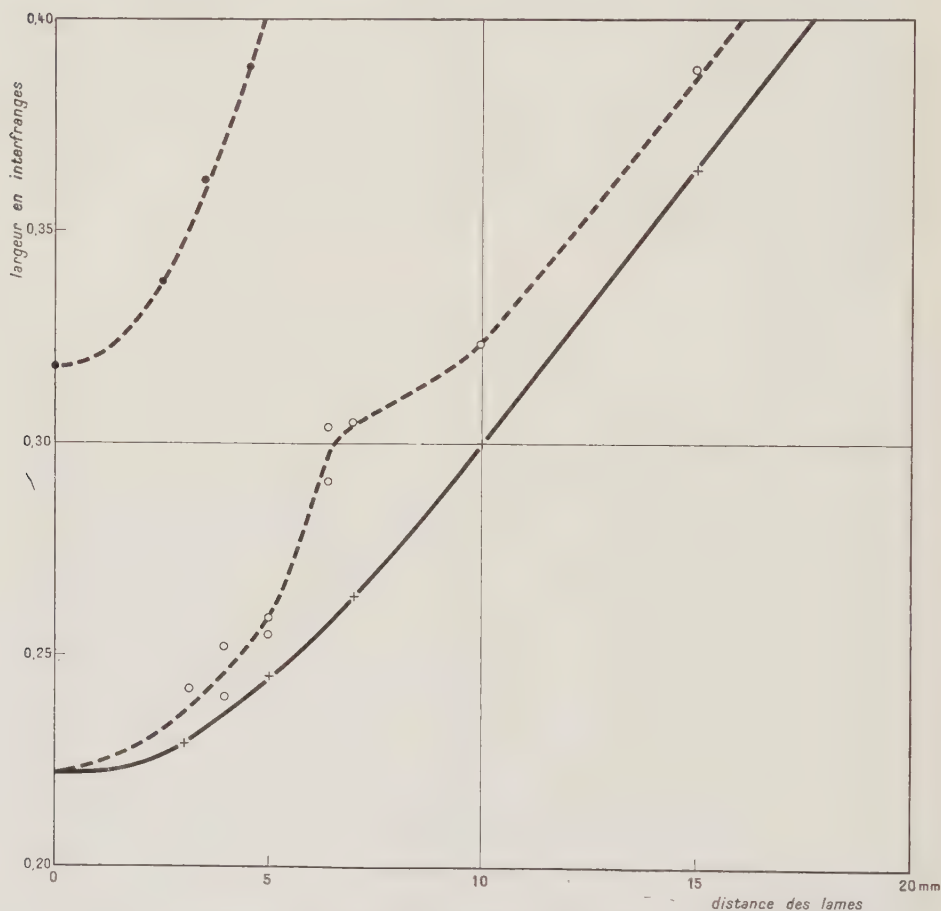


FIG. 34. — Variation de la largeur des anneaux, en fonction de la distance des lames.

- $f = 0,3965$, largeurs mesurées.
- $f = 0,51$, largeurs mesurées.
- + points calculés.

qu'une faible partie de l'image du diaphragme d'ouverture de l'appareil ; pour $D = 4$ mm l'influence de ce diaphragme sur la forme des anneaux est pratiquement négligeable ; néanmoins, je n'ai pas essayé d'employer des différences de marche plus grandes, et j'ai repris les mesures par la méthode de l'écran auxiliaire.

B. *Variation de la largeur des anneaux avec la différence de marche ;
méthode de l'écran auxiliaire.*

On observe encore une variation initiale rapide de la largeur des anneaux, mais au delà de $D = 6 \text{ mm}$ la courbe change d'aspect. Le tableau 17 et la courbe 34 donnent les résultats des expériences ; les distances D sont mesurées directement ; les largeurs sont la moyenne des mesures faites sur deux bords diamétralement opposés de l'anneau le plus large. La largeur d'un anneau déterminé est connue avec une erreur de 2 %. Les anneaux extérieurs donnent des indications moins précises ; le grain de plaque introduit dans la mesure des abscisses une erreur absolue constante (0,2 mm à l'amplification 14), alors que la grandeur à mesurer décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de la figure d'interférences.

TABLEAU 17.

N° de plaque	D	Largeur en interfanges
Calculé	0	0,222
B 304	3,12 mm	0,242
B 259	3,94	0,240
B 260	3,94	0,252
B 297	5,00	0,255
B 293	5,00	0,259
B 261	6,41	0,394
B 300	6,41	0,291
B 306	7,01	0,305
B 292	10,00	0,323
B 295	15,00	0,388

Dans ces mesures, $f = 0,51$.

La courbe 34 représente les résultats ; la courbe en trait plein donne, à titre d'indication, la variation de largeur pour une raie de même longueur d'onde, présentant un élargissement Doppler-Fizeau :

$$\Delta\lambda = 0,03 \text{ \AA}.$$

On voit que la largeur des anneaux augmente rapidement jusqu'à $D = 6,5 \text{ mm}$; la courbe représentative croît ensuite beaucoup moins vite si l'on continue à écarter les lames ; sa variation est alors comparable à celle de la courbe en trait plein. Tout se passe comme si l'on pouvait, en première approximation, représenter la raie comme formée d'une partie fine et d'une composante très élargie de même longueur d'onde moyenne ; pour $D = 6,5 \text{ mm}$ les anneaux de la partie

élargie seraient brouillés et donneraient un éclaircissement pratiquement continu où se dessineraient les anneaux de la composante fine (1).

Il est plus vraisemblable de supposer que les tubes à haute fréquence donnent des raies dont les ailes ont une intensité notable, même assez loin du maximum.

J'ai cherché si cet élargissement de la raie ne pouvait pas provenir d'une cause extérieure à la source ; en particulier des réflexions successives sur les semi-argentures légères que j'utilisais. Rocard (2) a essayé des expériences analogues pour des miroirs métalliques compacts ; il n'a pas constaté d'élargissement observable. J'ai repris ces mesures, dans des conditions légèrement différentes, en envoyant dans mes appareils de la lumière trois fois réfléchi sur des glaces fortement argentées et une fois sur une semi-argenteure de pouvoir réflecteur voisin de 0,5 ; je n'ai constaté aucune modification de la largeur des anneaux. L'élargissement de la raie paraît bien dû à une cause intérieure à la source.

Je me suis placé dans les conditions d'observation où le rôle du pied de la raie était le plus facile à déceler (source intense, argenteure faible) ; dans les mesures de largeurs de raies, on emploie au contraire des sources peu poussées et des pouvoirs réflecteurs voisins de 0,9 ; on peut néanmoins se demander si, même dans ce cas, on n'a pas de phénomènes analogues ; cela pourrait expliquer, partiellement tout au moins, les écarts entre le pouvoir réflecteur réel et le pouvoir réflecteur efficace, observés par Burger et van Cittert ; cette hypothèse rendrait compte également de l'éclaircissement anormal des minima, observé par divers auteurs (3), dans les mesures photométriques sur les anneaux à l'infini.

IV. — ÉTUDE DE L'INTENSITÉ LUMINEUSE ÉMISE PAR LES TUBES DANS LA DÉCHARGE EN HAUTE FRÉQUENCE. TUBES A HÉLIUM

Au cours de mes recherches, j'ai été amené à préciser les conditions de fonctionnement des sources de haute fréquence ; j'ai utilisé l'émission lumineuse de l'hé-

(1) Koch, *Ann. der Phys.*, 42 (1913), p. 21, a mesuré pour quatre positions des lames la largeur des anneaux donnée par la raie rouge du cadmium ; la source était un arc à vapeur de cadmium, donnant une raie dont la largeur était 0,03 Å. Cette source est donc assez semblable à la mienne. L'auteur a obtenu pour $D = 4$ mm, 8 une largeur trop grande des anneaux. Malheureusement le nombre restreint des mesures ne permet pas de conclure : Koch attribue cette anomalie à des erreurs expérimentales. On peut toutefois se demander si la structure de la raie étudiée par Koch ne serait pas analogue à celle que j'ai observée dans les sources excitées en haute fréquence.

(2) Rocard, *C. R.*, 186 (1928), p. 313.

(3) Granath et van Atta signalent ainsi l'existence d'un fond continu important dans leurs mesures sur les structures du sodium. Granath et van Atta, *Physical Review*, 44 (1933), p. 935.

lium. On peut alors, comme je l'ai dit plus haut, avoir un fonctionnement bien défini du tube, si l'on maintient constantes les tensions d'alimentation.

J'ai étudié simultanément les conditions électriques et optiques du passage de la décharge ⁽¹⁾. Le chauffage des lampes oscillatrices était maintenu constant (16,1 volts et 7,7 ampères par filament) ; la longueur d'onde était 12 m ; la densité du gaz constante (tube scellé). Selon les conditions d'excitation, le tube présente deux types de décharge : *électrostatique* ou *induite* ⁽²⁾. On obtient une représentation simple des résultats en prenant pour paramètre le potentiel continu V appliqué au point milieu de l'enroulement de plaque.

Mesures électriques.

J'ai mesuré les courants de retour I_p et I_g des plaques et des grilles. La figure 35 se rapporte aux faibles tensions anodiques ; le tube est faiblement lumineux

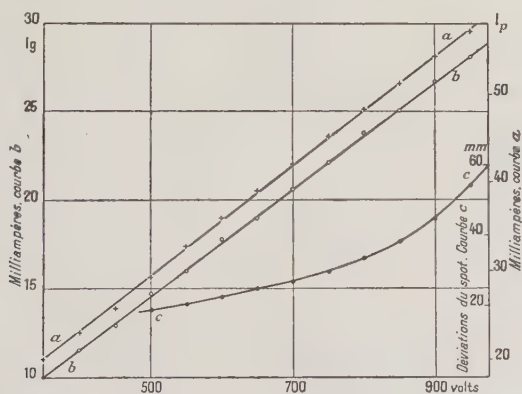


FIG. 35. — Courbe a , courant I_p . Courbe b , courant I_g .
Courbe c , déviation en millimètres du spot pour la raie rouge.

(décharge électrostatique) ; I_p (courbe a) et I_g (courbe b) varient linéairement en fonction de V . Le tube réagit très peu sur l'oscillateur ; si on l'écarte, le courant de plaque baisse un peu, et le courant de grille augmente.

EXEMPLE. — Tube dans le solénoïde :

$$V = 850 \text{ volts} \quad I_p = 51 \text{ milliampères} \quad I_g = 25,1 \text{ milliampères.}$$

Tube enlevé :

$$V = 850 \quad I_p = 49 \quad I_g = 26,2$$

(1) Roig. *C. R.*, 204 (1937), p. 961.

(2) Esclangon. *Annales de Physique*, I (1934), p. 267.

Les relations linéaires se conservent jusqu'au delà de 1250 volts, en l'absence du tube à décharge ; par contre sa présence dans le solénoïde provoque vers 1 000 volts un changement très net. Il y a passage continu, mais rapide, de la décharge électrostatique à la décharge induite ; I_g passe par un maximum à 1 050 volts et décroît ensuite lentement (fig. 36, courbe b) ; I_p subit une augmentation rapide, puis suit à nouveau une loi linéaire (fig. 36, courbe a).

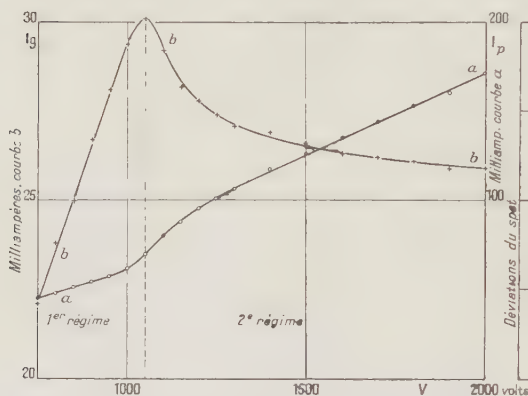


FIG. 36. — Courbe a , courant I_p .
Courbe b , courant I_g .

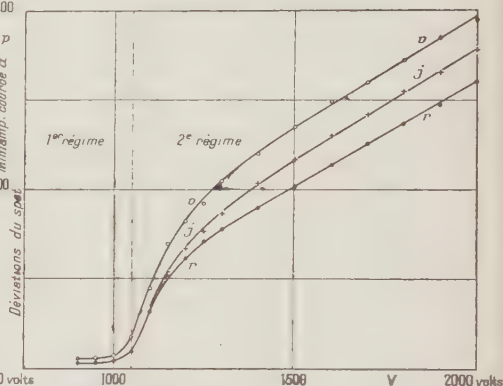


FIG. 37. — Indications de la cellule, unités arbitraires pour chaque courbe.
Courbe v , raie violette. Courbe j , raie jaune. Courbe r , raie rouge.

Mesures optiques.

J'ai simultanément étudié les variations d'intensité de quelques raies d'arc. Je forme l'image de la source sur le diaphragme d'entrée d'une cellule photoélectrique à vide, qui travaille au-dessus de sa tension de saturation. La précision des mesures est d'environ 1 pour 100. Des écrans de gélatine colorée isolent parfaitement les raies 6 678 et 5 875 Å. La raie 4 471 est accompagnée de la radiation 4 743, très affaiblie. L'écran violet laisse passer suffisamment d'infrarouge pour donner une forte dérive au spot ; on obtient, même aux régimes poussés, des mesures correctes en refroidissant le tube par soufflage à l'air comprimé, et en interposant une cuve absorbante (solution de Cu Cl_2 à 2 pour 100).

La figure 35 (courbe c) montre en unités arbitraires les variations de brillance pour la raie rouge dans le premier régime. La figure 37 (courbes r , j , v) donne de même les variations de brillance pour les raies rouge, jaune et violette dans la décharge induite ; le changement de régime s'accompagne d'une forte augmentation d'éclat. On obtient encore, pour des potentiels élevés, une loi linéaire. Les prolongements des trois droites ne coupent pas l'axe des abscisses exactement au même point, mais en des points voisins. L'intensité relative des trois raies varie donc légèrement avec l'excitation.

**Largeur des raies émises par l'hélium dans la décharge
en haute fréquence. Température du gaz (1).**

L'étude de la largeur des raies émises par un tube de Geissler donne pour le gaz la même température que pour le milieu extérieur (2). La décharge en haute fréquence produit au contraire un échauffement notable des tubes à gaz raréfié. Je me suis proposé de déterminer les températures atteintes par les atomes émetteurs ; les mesures n'exigent pas une grande précision, car la température de l'enceinte n'est pas absolument uniforme.

Les tubes sont placés au centre d'un solénoïde parcouru par des courants de haute fréquence ; la longueur d'onde est de 14 m ; il est difficile, dans ces conditions, d'employer un thermomètre à mercure ou un couple thermoélectrique ; j'ai utilisé un thermomètre à air.

Le tube à décharge est à double enceinte ; un réservoir central en verre mince communique avec l'air extérieur par un tube capillaire ; le tube extérieur est relié à une installation à vide ; le gaz s'illumine dans l'espace annulaire compris entre les deux parois. Durant le passage de la décharge, le réservoir central se met en équilibre thermique avec le gaz ; une partie de l'air qu'il renferme s'échappe ; je mesure au refroidissement les variations de volume à pression constante (pesées de mercure) ou les variations de pression à volume constant.

Je mesure d'autre part l'ordre d'interférence limite N auquel disparaissent les anneaux. Pour l'hélium, l'effet Doppler-Fizeau est prépondérant et l'on a, entre N et la température absolue T , la relation :

$$N = 1,22 \times 10^6 \sqrt{\frac{m}{T}},$$

m , masse atomique de la particule émettrice.

Les mesures ont porté sur la raie simple 6 678 Å et sur la raie 5 876 Å ; cette dernière est un doublet, mais, pour des sources peu poussées, une des composantes est faible et ne gêne pas dans les mesures.

Les anneaux ont été observés avec un interféromètre de Michelson ; une face de la séparatrice est assez fortement argentée pour éliminer un système parasite d'anneaux produits par l'autre face.

Ces mesures comportent deux causes d'erreur : D'une part, il faut disposer d'une quantité suffisante de lumière ; au-dessous d'un certain éclat l'œil apprécie mal la disparition des anneaux. D'autre part, il faut éviter de prendre des

(1) Roig. *C. R.*, 202 (1936), p. 1044.

(2) Buisson et Fabry, *J. de Phys.*, 2 (1912), p. 450.

sources trop poussées ; l'absorption élargit alors les raies et peut même renverser la raie jaune.

La pureté du gaz a une grande importance dans les mesures ; des traces d'eau ou d'hydrogène gênent considérablement l'illumination de l'hélium ; or le tube à réservoir intérieur est très difficile à dégazer, même par chauffage en haute fréquence ; j'ai obtenu des résultats satisfaisants en laissant le tube en permanence sur l'installation à vide ; les impuretés sont condensées dans les pièges à air liquide, à mesure qu'elles se dégagent.

Le tableau 18 donne les résultats des mesures : les trois premières colonnes concernent le fonctionnement de l'oscillateur.

TABLEAU 18.

Tension de plaque (volts)	Courant de grille (milliam-pères)	Courant de plaque (ampères)	Pression du gaz (millimètres de mercure)	Température mesurée (degrés)	Ordre d'interférence calculé	Ordre d'interférence mesuré	
						raie jaune	raie rouge
1 760	19	0,190	0,057	187	114 000	108 000	103 000
»	»	»	0,088	215	110 500	108 000	»
1 880	7	0,160	0,190	210	111 000	108 000	106 000
2 160	9	0,190	0,318	205	111 500	108 000	104 000
1 800	12	0,180	0,326	196	113 000	105 000	104 500
1 840	15	0,200	0,930	250	106 500	104 000	»

Bien que les conditions du tube aient varié dans d'assez larges limites, la température est toujours demeurée au voisinage de 200° C ; les raies sont légèrement élargies, vraisemblablement par absorption ; les écarts entre les ordres d'interférence trouvés pour les deux raies sont systématiques et du même ordre que l'écart avec les nombres calculés.

Etude du doublet jaune de l'hélium $\lambda = 5\,876\text{ \AA}$.

Le doublet jaune de l'hélium est très sensible au renversement : Burger ⁽¹⁾ a montré que dans les tubes de Geissler, le rapport des composantes passe de 1/6 pour des tubes ordinaires à 1/8 pour des tubes durs, remplis à très faible pression ; cette dernière valeur est la valeur théorique, si l'on admet que le doublet est en réalité un triplet 1-3-5 à deux composantes confondues. J'ai observé dans la décharge en haute fréquence des renversements plus notables encore ; l'écran photométrique a été étalonné avec la raie rouge du cadmium, mais on peut considérer que ces écrans sont à peu près neutres dans le spectre visible ⁽²⁾.

(1) Burger. *Zeits. für Physik*, 38 (1926), p. 437.

(2) Fabry et Buisson. *Revue d'Optique*, 3 (1924), p. 21.

Voici les résultats d'une mesure pour un oscillateur assez poussé ; la distance des lames est telle que les systèmes d'anneaux donnés par les deux composantes sont à peu près en discordance.

Plaque B 245. Tension anodique : 2020 volts. Courant anodique : 215 milliam-pères. Courant de grille : 36 milliam-pères.

Distance des lames : 2,41 mm. Pouvoir réflecteur : 0,8. Rapport des intensités des composantes : $I_1/I_2 = 0,55$. Ce rapport est le même pour les deux parties diamétralement opposées de l'anneau central.

La composante faible a donc une intensité anormalement grande ; par contre, la distance des composantes n'a pas subi de modifications :

$$\Delta\lambda \text{ mesuré} = 0,343 \text{ \AA} \qquad \Delta\lambda \text{ des Tables} = 0,342 \text{ \AA}.$$

Etude de la raie 5 086 Å du cadmium.

Schüler et Keyston ⁽¹⁾ ont signalé que la structure hyperfine des raies du triplet du cadmium est très sensible aux conditions de fonctionnement de la source ; j'ai examiné le comportement de la raie 5 086 Å dans les sources de haute fréquence. Cette raie possède trois composantes dont les intensités théoriques respectives sont 1-9-5. Je n'ai pas fait de mesures photométriques ; mais sur l'enregistrement la composante d'intensité théorique 5 est à peine visible. La composante d'intensité théorique 1 est au contraire presque aussi forte que la composante principale.

La plaque n° B 200 correspondant à cette expérience a été posée dans les conditions suivantes :

Pouvoir réflecteur : 0,83. Distance des lames : 21,5 mm.

La séparation mesurée des composantes est, dans l'échelle des nombres d'ondes :

$$d\nu = \quad + 101 \quad 0 \quad - 290 \quad \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}.$$

Ces nombres sont voisins de ceux indiqués par A. Schrammen ⁽²⁾ :

$$d\nu = \quad + 104 \quad 0 \quad - 290 \quad \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}.$$

Schüler et Keyston ⁽³⁾ indiquent, pour des sources à cathode creuse, les composantes de la raie non perturbée :

$$d\nu = \quad + 96 \quad 0 \quad - 300 \quad \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}.$$

(1) Schüler et Keyston. *Zeits. für Physik*, 71 (1931), p. 415.

(2) A. Schrammen. *Annalen der Physik*, 83 (1927), p. 1188.

(3) Schüler et Keyston. *Zeits. für Physik*, 67 (1931), p. 433.

L'écart des composantes est donc sensiblement le même, tandis que les intensités sont fortement modifiées.

Ces diverses mesures sont à rapprocher des observations d'Esclangon (1) sur la raie verte du mercure : certaines composantes sont exagérées par le renversement de la raie ; il semble qu'il n'y ait pas absorption pure et simple, mais perturbation des raies d'émission sous l'action du champ interatomique ; les champs électriques et magnétiques de haute fréquence n'ont pas une intensité suffisante pour donner un effet mesurable.

(1) Esclangon. *Annales de Physique*, 1 (1934), p. 385.

CONCLUSION

I. La précision des méthodes photométriques que j'ai décrites a été contrôlée :
1^o par l'accord entre les mesures photographiques et photoélectriques ;
2^o par l'accord entre les mesures et la théorie dans l'étude du pied des anneaux.

II. J'ai retrouvé les résultats de Burger et van Cittert concernant l'écart entre le pouvoir réflecteur mesuré et le pouvoir réflecteur efficace ; mais il semble que dans mes mesures le désaccord provienne surtout de la forme anormale de la raie et non de défauts accidentels répartis sur les lames.

III. Les tubes illuminés en haute fréquence donnent, dans les conditions normales d'emploi, des raies fortement perturbées ; la raie rouge du cadmium possède un pied particulièrement intense.

La variation de la largeur des anneaux avec la différence de marche indique l'existence d'une partie très élargie de cette raie.

IV. J'ai précisé les conditions électriques et optiques de la décharge dans le cas de l'hélium ; on obtient une représentation simple des mesures en prenant comme paramètre le potentiel continu appliqué aux anodes de l'oscillateur.

V. Les méthodes de mesure permettront d'étudier photométriquement la forme ou la structure hyperfine des raies ; il faudra, avant de pousser plus loin les recherches, perfectionner les sources, par exemple utiliser des lampes du type Schüller. La haute fréquence ne doit pas être systématiquement rejetée ; j'ai montré qu'elle ne donne pas de déplacement important des composantes, mais qu'elle en modifie simplement l'intensité ; ceci peut être avantageux pour déceler des satellites qui, dans les sources normales, auraient une intensité trop faible ; enfin il doit être possible, en modifiant la forme des sources de haute fréquence et en renonçant au besoin à des brillances trop grandes, d'atténuer le renversement des raies.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
--------------------	---

PREMIÈRE PARTIE : MÉTHODES PHOTOMÉTRIQUES

CHAPITRE 1. <i>Généralités sur la photométrie photographique</i>	4
CHAPITRE 2. <i>Principes des méthodes de mesure</i>	6
CHAPITRE 3. <i>Erreurs concernant l'image photographique</i>	10
CHAPITRE 4. <i>Montages et appareils</i>	20
A) Méthode du biréfringent.....	20
B) Emploi d'écrans auxiliaires.....	25
CHAPITRE 5. <i>Etude des clichés ; examen au microphotomètre</i>	27
CHAPITRE 6. <i>Discussion générale des erreurs commises dans les mesures. Exemple de mesure photométrique</i>	33

DEUXIÈME PARTIE : INTERFÉRENCES

Etude des anneaux à l'infini des lames semi-argentées.

CHAPITRE 1. <i>Généralités sur les appareils à ondes multiples</i>	42
CHAPITRE 2. <i>Variation de la largeur des anneaux avec la différence de marche</i>	52
CHAPITRE 3. <i>Réalisation des interférences</i>	56
1) La source.....	56
2) Les argentures.....	61
3) L'interféromètre et le montage thermostatique.....	68

TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS DES MESURES

I. Rayons des anneaux successifs.....	76
II. Anneaux à faible différence de marche.....	77
III. Variation de la largeur des anneaux avec l'écartement des lames	85
IV. Etude de l'intensité lumineuse émise dans la décharge en haute fréquence ; tubes à hélium.....	90
CONCLUSION	97

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté :

Structure hyperfine et noyau atomique.

Vu et approuvé :

Paris, le 14 octobre 1937.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

CH. MAURAIN.

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

ROUSSY.

2542. — Imprimerie Jouve et Cie, 15, rue Racine, Paris. — 11-1937.
